

Universidade Federal de Santa Catarina
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - PPGEC

**METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE GERAÇÃO
FOTOVOLTAICA EM ÁREAS URBANAS
APLICADA A FLORIANÓPOLIS E BELO HORIZONTE**

ISABEL TOURINHO SALAMONI

Florianópolis – SC
2004

Universidade Federal de Santa Catarina
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - PPGEC

**METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE GERAÇÃO
FOTOVOLTAICA EM ÁREAS URBANAS
APLICADA A FLORIANÓPOLIS E BELO HORIZONTE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

ISABEL TOURINHO SALAMONI

Área de Concentração: Construção Civil
Orientador: Ricardo Rüther, PhD.
Coorientador: Paulo Knob, Dr. Ing

Florianópolis – SC
2004

Universidade Federal de Santa Catarina
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - PPGEC

**METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE GERAÇÃO
FOTOVOLTAICA EM ÁREAS URBANAS
APLICADA A FLORIANÓPOLIS E BELO HORIZONTE**

ISABEL TOURINHO SALAMONI

Dissertação defendida e aprovada em 21/05/2004 pela comissão examinadora.

Prof.PhD. Henriette Lebre La Rovere (Coordenadora do PPGEC - UFSC)

Prof. PhD. Ricardo Rüther. (Orientador - UFSC)

Prof. Dr. Ing. Paulo Knob (Coorientador - UFSC)

BANCA EXAMINADORA

PhD. Antônio Sônia Cardoso Diniz - CEMIG

Prof. Dr. Roberto Zilles - USP

Prof. PhD. Roberto Lamberts - UFSC

Prof. Dr. Luis Alberto Gómez - UFSC

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Alceu e Marilena e as minhas irmãs Adriana e Daniela, por todo incentivo, carinho, compreensão e amor.

Ao Professor Ricardo Rüther pelo seu incentivo, orienta  o e incansável dedica  o para a realiza  o deste trabalho.

Ao Professor Paulo Knob pela sua orienta  o, colabora  o, disponibilidade e companheirismo durante todo o decorrer da pesquisa.

A minha colega Carolina Jardim pela amizade, troca de conhecimentos, colabora  o e apoio em todos os momentos.

Aos colegas e amigos do LabEEE pela compreensão, paciência e auxílio em todos os momentos difíceis.

Aos professores Roberto Lamberts, Luis Alberto Gómez, Roberto Zilles e    Ant  nia S  nia Cardoso Diniz pela participa  o da banca examinadora.

   Professora Eleonora Sad de Assis (UFMG) pela sua aten  o, disponibilidade e fornecimento de dados e informa  es sobre a Cidade de Belo Horizonte.

   CAPES e    CEMIG pelos programas de financiamento e fornecimento de bolsas de estudo.

   CELESC, CEMIG, PRODABEL e IPUF pelos dados fornecidos para a realiza  o da pesquisa.

A todos os meus amigos, que de uma forma ou de outra sempre estiveram ao meu lado e souberam compreender e apoiar todas as minhas decisões.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	IV
LISTA DE TABELAS.....	VIII
RESUMO.....	01
ABSTRACT.....	02
1. CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....	03
1.1 Introdução.....	04
1.2 Colocação do Problema.....	07
1.3 Objetivos.....	10
1.3.1 Objetivos Gerais.....	10
1.3.2 Objetivos Específicos.....	10
1.4 Estrutura do Trabalho.....	11
2. CAPÍTULO 2: REVISÃO BLIOGRÁFICA.....	12
2.1 Introdução.....	13
2.2 Evolução no Consumo de Energia Elétrica e Perspectivas.....	13
2.3 Gerenciamento pelo Lado da Demanda.....	15
2.4 Impactos Sociais e Ambientais.....	15
2.5 A Energia Fotovoltaica.....	17
2.6 Tecnologias Disponíveis.....	24
2.6.1 Silício Mono Cristalino (m-Si) e Silício Poli Cristalino (p-Si).....	26
2.6.2 Silício Amorfo Hidrogenado (a-Si).....	27
2.6.3 Telureto de Cádmio (CdTe).....	28
2.6.4 Disseleneto de Cobre e Índio (CIS).....	29
2.6.5 HIT.....	30
2.7 Aspectos Ambientais.....	31
2.8 Sustentabilidade e Eficiência Energética.....	32
2.9 Viabilidade Econômica.....	33
2.10 Programas de Incentivo.....	36

2.11 Conclusão.....	41
3.CAPÍTULO 3: METODOLOGIA	42
3.1 Introdução.....	43
3.2 Objeto de Estudo.....	43
3.2.1 Setores da Cidade de Florianópolis.....	44
3.2.2 Setores da Cidade de Belo Horizonte.....	45
3.3 Coleta de Dados.....	47
3.3.1 Pesquisa Documental.....	47
3.3.2 O Universo Traçado na Busca de Informações.....	47
3.4 Caracterização da Coleta de Dados.....	50
3.5 Quantificação das Áreas de Cobertura.....	50
3.5.1 Amostragem para a Cidade de Florianópolis.....	51
3.6 Cálculo para Percentual de Sombreamento.....	52
3.7 Inclinação e Orientação.....	54
3.8 Cálculo de Radiação e Geração Solar Fotovoltaica.....	57
4. CAPÍTULO 4: RESULTADOS OBTIDOS.....	62
4.1 Introdução.....	63
4.2 Setores da Cidade de Florianópolis.....	64
4.2.1 Cálculo de Geração Fotovoltaica e Área Requerida.....	70
4.2.1.1 Setor Jurerê.....	70
4.2.1.1.1 Primeiro Estudo de Caso – Superfícies Planas e Horizontais.....	70
4.2.1.1.2 Segundo Estudo de Caso – Superfícies Inclínadas a 27 graus.....	73
4.2.1.1.3 Terceiro Estudo de Caso – Condições Reais.....	75
4.2.2.1 Setor Centro.....	81
4.2.2.1.1 Primeiro Estudo de Caso – Superfícies Planas e Horizontais.....	81
4.2.2.1.2 Segundo Estudo de Caso Superfícies Inclínadas a 27 graus.....	83
4.2.2.1.3 Terceiro Estudo de Caso – Condições Reais.....	84
4.2.2 Análise dos resultados para a cidade de Florianópolis.....	87

4.3 Setores da Cidade de Belo Horizonte.....	93
4.3.1 Cálculo de Geração Fotovoltaica e Área Requerida.....	100
4.3.1.1 Setor Hiper Centro.....	101
4.3.1.1.1 Primeiro Estudo de Caso – Superfícies Planas e Horizontais.....	101
4.3.1.1.2 Segundo Estudo de Caso – Superfícies Inclinadas a 20 graus.....	104
4.3.1.1.3 Terceiro Estudo de Caso – Condições Reais.....	107
4.3.1.2 Setor Floresta.....	108
4.3.1.2.1 Primeiro Estudo de Caso – Superfícies Planas e Horizontais.....	108
4.3.1.2.2 Segundo Estudo de Caso – Superfícies Inclinadas a 20 graus.....	109
4.3.1.2.3 Terceiro Estudo de Caso – Condições Reais.....	111
4.3.1.3 Setor Santa Efigênia.....	112
4.3.1.3.1 Primeiro Estudo de Caso – Superfícies Planas e Horizontais.....	112
4.3.1.3.2 Segundo Estudo de Caso – Superfícies Inclinadas a 20 graus.....	114
4.3.1.3.3 Terceiro Estudo de Caso – Condições Reais.....	115
4.3.2 Análise dos resultados para a cidade de Belo Horizonte.....	117
4.4 Conclusões.....	127
 5. CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES.....	129
5.1 Conclusões Finais.....	130
5.2 Limitações do Trabalho.....	133
5.3 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	134
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	135
TRABALHOS PUBLICADOS.....	140

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Atlas solarimétrico do Brasil.....	18
Figura 2: Diagrama esquemático de um sistema solar fotovoltaico integrado à edificação e interligado à rede elétrica.....	20
Figura 3: Desenvolvimento do mercado Fotovoltaico mundial nas últimas décadas em megawatt por ano.....	23
Figura 4: Mercado mundial das diferentes tecnologias fotovoltaicas, em 2001.....	26
Figura 5: Mapa de localização do setor Jurerê na cidade de Florianópolis.....	44
Figura 6: Mapa de localização do setor Centro na cidade de Florianópolis.....	45
Figura 7 : Mapa de localização dos setores Hiper Centro, Floresta e Santa Efigênia da cidade de Belo Horizonte	46
Figura 8: Edificações da amostra do setor Jurerê.....	51
Figura 9: Edificações da amostra do setor Centro.....	51
Figura 10 : Imagem do Programa <i>Lightscape</i> para o Solstício de Verão, às 9 horas, no setor Jurerê.....	53
Figura 11: Imagem do Programa <i>Lightscape</i> para o Solstício de Verão, às 9 horas, no setor Centro.....	53
Figura 12: Vista aérea do setor residencial da cidade de Florianópolis.....	64
Figura 13: Vista aérea do setor Centro da cidade de Florianópolis.....	74
Figura 14: Dados de consumo energético para o setor Jurerê (alimentador INE 02), da cidade de Florianópolis, para os 12 meses do ano.....	65

Figura 15: Dados de consumo energético para o setor Centro (alimentador ICO 07), da cidade de Florianópolis, para os 12 meses do ano.....	66
Figura 16: Curva de demanda do setor Jurerê, da cidade de Florianópolis, para dia de maior pico (dia 18/01/01).....	67
Figura 17: Curva de demanda do setor Centro da cidade de Florianópolis, para dia de maior pico de demanda (dia 09/03/02).....	68
Figura 18: Curva de geração solar para um dia limpo do mês de dezembro (dia 03/01/02), para a cidade de Florianópolis, medida na estação da Universidade Federal de Santa Catarina, considerando as superfícies inclinadas a 27^0 e voltadas para o norte geográfico.....	69
Figura 19: Curva de geração solar para um dia limpo do mês de junho (dia 04/06/01) para a cidade de Florianópolis, medida na estação da Universidade Federal de Santa Catarina, considerando as superfícies inclinadas a 27^0 e voltadas para o norte geográfico.....	70
Figura 20: Curva de radiação solar, média mensal do total diário, considerando as superfícies como horizontais, para a cidade de Florianópolis.....	72
Figura 21: Curva de radiação solar, média mensal do total diário, considerando as superfícies inclinadas a 27 graus e voltadas para o norte geográfico.....	75
Figura 22: Curvas de demanda, geração solar e demanda menos geração no alimentador do setor Jurerê da cidade Florianópolis, considerando a potência instalada como 20% da demanda máxima histórica do setor.....	89
Figura 23: Curvas de demanda, geração solar e demanda menos geração, no setor Centro da cidade de Florianópolis, considerando como potência instalada 20% da demanda máxima histórica do setor.....	91
Figura 24: Curva de demanda energética e geração solar fotovoltaica, no setor Centro da cidade de Florianópolis, para um dia limpo, considerando como potência instalada toda a área de cobertura das edificações e a tecnologia FV baseada em a-Si (dia 03/02/2002).....	93
Figura 25: Vista aérea do setor Hiper Centro da cidade de Belo Horizonte.....	95
Figura 26: Vista aérea do setor Floresta da cidade de Belo Horizonte.....	95

Figura 27: Vista aérea do setor Santa Efigênia da cidade de Belo Horizonte.....	96
Figura 28: Curva de demanda da região Hiper Centro para dia de maior demanda (dia 01/01/04).....	98
Figura 29: Curva de demanda do setor Floresta da cidade de Belo Horizonte, para dia de maior pico dia 01/01/04).....	98
Figura 30: Curva de demanda do setor Santa Efigênia da cidade de Belo Horizonte, para dia de maior pico (dia 02/01/04).....	99
Figura 31: Curva de geração solar para um dia limpo do mês de janeiro, medida através de dados satélites da a cidade de Belo Horizonte, considerando as superfícies inclinadas a 20^0 e voltadas para o norte geográfico.....	100
Figura 32: Curva de geração solar para um dia limpo do mês de julho, medida através de dados satélites da a cidade de Belo Horizonte, considerando as superfícies inclinadas a 20^0 e voltadas para o norte geográfico.....	101
Figura 33: Curva de radiação solar, total diário da média mensal para a cidade de Belo Horizonte, considerando as superfícies como horizontais.....	103
Figura 34: Curva de radiação solar, total diário da média mensal, para a cidade de Belo Horizonte, considerando as superfícies inclinadas a 20 graus.....	106
Figura 35: Curvas de demanda, geração solar e demanda menos geração, no setor Hiper Centro da cidade de Belo Horizonte, considerando como potência FV instalada 20% da demanda máxima histórica do setor (dia 02/01/2004).....	119
Figura 36: Curva de carga referente ao alimentador BHBP 18 do setor Hiper Centro da cidade de Belo Horizonte, para dia de maior pico, identificado como o melhor alimentador para a implementação do sistema. (dia 02/01/04).....	121
Figura 37: Curvas de demanda, geração solar e demanda menos geração, no alimentador BHBP 18 do setor Hiper Centro da cidade de Belo Horizonte, considerado o melhor alimentador para receber a contribuição da energia fotovoltaica, considerando como potência instalada toda a área de cobertura do setor. (dia 02/01/2004).....	122

Figura 38: Curvas de demanda, geração solar e demanda menos geração, no setor Hiper Centro da cidade de Belo Horizonte, considerado como potência instalada toda a área de cobertura do setor. (dia 01/01/2004).

Figura 39: Curvas de demanda, geração solar e demanda menos geração, no setor Floresta da cidade de Belo Horizonte, considerando como potência instalada 20% da demanda máxima histórica do setor (dia 02/01/2004).....**123**

Figura 40: Curvas de demanda, geração solar e demanda menos geração, no setor Santa Efigênia, considerando como potência instalada 20% da demanda máxima histórica do setor (dia 02/01/2004).....**124**

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características das tecnologias dos painéis fotovoltaicos utilizados para os estudos de caso, nas regiões de Florianópolis e Belo Horizonte.....	59
Tabela 2: Valores das eficiências das tecnologias utilizadas, considerando uma temperatura padrão de 25 ⁰ (STC) e considerando uma temperatura média de operação de 45 ⁰	60
Tabela 3: Valores de EFF _{NOCT} das tecnologias fotovoltaicas utilizadas para os estudos de caso.....	70
Tabela 4: Dados de radiação solar para superfícies planas e horizontais, na cidade de Florianópolis.....	71
Tabela 5: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P _{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Jurerê da cidade de Florianópolis, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o primeiro estudo de caso (superfícies na horizontal).....	72
Tabela 6: Dados de radiação para superfícies inclinadas a 27 graus e orientadas para o norte geográfico, na cidade de Florianópolis.....	73
Tabela 7: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P _{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Jurerê da cidade de Florianópolis, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o seg estudo de caso (superfícies com inclinação igual à latitude local e voltadas para o norte geográfico).....	75
Tabela 8: Dados referentes à inclinação e às áreas reais e estimadas das coberturas individuais selecionadas pela amostra para o setor Jurerê da cidade de Florianópolis.....	76
Tabela 9: Dados referentes às áreas reais das coberturas das edificações da amostra, equivalentes a cada orientação, bem como seus valores médios, para o setor Jurerê da cidade de Florianópolis.....	76
Tabela 10: Valores das médias de área estimada por edificação para cada orientação considerada útil, obtidas através da relação entre média estimada e média real, relação entre média de área estimada sombreada e média de área estimada total, média estimada de área sombreada por orientação e média de área útil para a implementação do sistema FV, por edificação do setor Jurerê da cidade de Florianópolis.....	78

Tabela 11: Dados de radiação solar para superfícies inclinadas a 24^0 (inclinação média das coberturas da amostra), considerando todas as orientações observadas nas amostras para o setor Jurerê da cidade de Florianópolis.....**78**

Tabela 12: : Valores das médias anuais de radiação solar para as orientações úteis, percentual da área estimada útil para cada orientação e valores das médias diárias anuais de radiação solar, considerando os percentuais de área para as correspondentes orientações. Estudo real das amostras, com inclinação igual a 24^0 , para o setor Jurerê da cidade de Florianópolis.....**79**

Tabela 13: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Jurerê da cidade de Florianópolis, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o terceiro estudo de caso (condições reais).....**80**

Tabela 14: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Centro da cidade de Florianópolis, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o primeiro estudo de caso (superfícies na horizontal).....**82**

Tabela 15: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Centro da cidade de Florianópolis, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o segundo estudo de caso (superfícies com inclinação igual à latitude local e voltadas para o norte geográfico).....**84**

Tabela 16: Dados referentes à inclinação e às áreas reais e estimadas das coberturas individuais selecionadas pela amostra para o setor Centro da cidade de Florianópolis.....**85**

Tabela 17: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Centro da cidade de Florianópolis, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o terceiro estudo de caso (condições reais).....**87**

Tabela 18: Valores percentuais de suprimento do consumo de energia no setor Jurerê, através da utilização de sistemas FV em toda a área de cobertura das edificações, considerando os três estudos de caso e as seis tecnologias FV disponíveis no mercado.....**89**

Tabela 19: Valores percentuais de suprimento do consumo de energia no setor Centro, através da utilização de sistemas FV em toda a área de cobertura das edificações, considerando os três estudos de caso e as seis tecnologias FV disponíveis no mercado.....**91**

Tabela 20: Valores de consumo energético em cada alimentador dos setores da cidade de Belo Horizonte.....**96**

Tabela 21: Dados de radiação solar para superfícies planas e horizontais da cidade de Belo Horizonte.....**102**

Tabela 22: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Hiper Centro da cidade de Belo Horizonte, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o primeiro estudo de caso (superfícies planas e horizontais).....**103**

Tabela 23: Dados de radiação para superfícies inclinadas a 20 graus e orientadas para o norte geográfico, na cidade de Belo Horizonte.....**104**

Tabela 24: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Hiper Centro da cidade de Belo Horizonte, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o segundo estudo de caso (superfícies inclinadas a 20 graus e orientadas para o norte verdadeiro).....**106**

Tabela 25: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Hiper Centro da cidade de Belo Horizonte, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o terceiro estudo de caso (condições reais).....**107**

Tabela 26: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Floresta da cidade de Belo Horizonte, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o primeiro estudo de caso (superfícies planas e horizontais).....**109**

Tabela 27: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Floresta da cidade de Belo Horizonte, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o segundo estudo de caso (superfícies inclinadas a 20 graus e orientadas para o norte verdadeiro).....**110**

Tabela 28: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo

energético do setor Floresta da cidade de Belo Horizonte, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o terceiro estudo de caso (condições reais).....111

Tabela 29: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Santa Efigênia da cidade de Belo Horizonte, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o primeiro estudo de caso (superfícies planas e horizontais).....113

Tabela 30: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Santa Efigênia da cidade de Belo Horizonte, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o segundo estudo de caso (superfícies inclinadas a 20 graus e orientadas para o norte verdadeiro).....114

Tabela 31: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Santa Efigênia da cidade de Belo Horizonte, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o terceiro estudo de caso (condições reais).....116

Tabela 32: Valores percentuais de suprimento do consumo de energia no setor Hiper Centro, da cidade de Belo Horizonte, através da utilização de sistemas FV em toda a área de cobertura das edificações, considerando os três estudos de caso e as seis tecnologias FV disponíveis no mercado.....118

Tabela 33: Valores percentuais de suprimento do consumo de energia no setor Floresta da cidade de Belo Horizonte, através da utilização de sistemas FV em toda a área de cobertura das edificações, considerando os dois estudos de caso e as seis tecnologias FV disponíveis no mercado.....124

Tabela 34: Valores percentuais de suprimento do consumo de energia no setor Santa Efigênia, através da utilização de sistemas FV em toda a área de cobertura das edificações, considerando os três estudos de caso e as seis tecnologias FV disponíveis no mercado.....126

RESUMO: Um sistema fotovoltaico (FV) integrado à edificação e interligado à rede elétrica é um exemplo de fonte geradora de energia ideal para aplicação em áreas urbanas, principalmente em países ensolarados. Além de gerar energia onde é necessário, ele faz uso de espaços já existentes (envelope da edificação), infra-estrutura (estrutura e instalação elétrica da edificação) e radiação solar disponível no local. Os sistemas utilizam módulos solares como elementos de revestimento, podendo ser incorporados na cobertura ou fachada do edifício. Aspectos ambientais e o crescente aumento da demanda energética mundial têm contribuído para a aceleração e desenvolvimento desta fonte de energia. O conhecimento do potencial deste sistema descentralizado no suprimento de energia junto ao ponto de consumo vai além da quantidade de energia que ele é capaz de produzir; a aplicação de plantas fotovoltaicas estrategicamente locadas em centros urbanos pode aumentar a capacidade da rede de distribuição local, auxiliando na redução do pico de carga. Esta pesquisa apresenta um estudo detalhado do potencial de sistemas fotovoltaicos em áreas urbanas de duas capitais do Brasil, Florianópolis - SC e Belo Horizonte - MG. As duas cidades apresentam diferentes características construtivas, de consumo energético, de níveis de radiação solar e de latitude local. Para a cidade de Florianópolis, foram escolhidos dois setores urbanos: um residencial (construções horizontais) e outro central-comercial (construções densas e verticais); para a cidade de Belo Horizonte foram escolhidos três setores urbanos, um residencial (construções horizontais), outro central-comercial (construções densas e verticais) e outro misto (construções variadas). Através da utilização das seis tecnologias FV comercialmente disponíveis no mercado, o estudo fez uma análise comparativa da performance de um gerador FV hipotético, composto pelo conjunto de um grande número de pequenos sistemas FV distribuídos pelos telhados das coberturas das edificações dos respectivos centros urbanos, considerando três possibilidades de distribuição dos módulos: na horizontal; com inclinação igual à latitude local e orientados para o norte geográfico; e com a inclinação e orientação real das coberturas de cada setor. Estes três estudos tiveram como finalidade verificar que nível de variação existe entre o caso real das edificações e os casos hipotéticos. Foi concluído que a variação entre os casos é bastante significativa. Desta forma torna-se imprescindível o cálculo do potencial de geração FV a partir da situação real das edificações. Foram quantificados os percentuais de suprimento do consumo energético correspondentes a cada setor e verificado o potencial de contribuição deste gerador para a concessionária local. Assim, foi possível identificar a influência da orientação e inclinação dos módulos solares, bem como a tecnologia adotada de acordo com as condições climáticas das regiões no rendimento de um sistema FV. As duas regiões mostraram bons resultados em termos de geração fotovoltaica e redução da curva de carga. Foi observado que a utilização do sistema em cada setor poderá auxiliar na rede elétrica de diferentes formas: tanto como uma fonte geradora de energia que poderá contribuir com a redução da sobrecarga da rede em alimentadores específicos; quanto como uma pequena usina geradora capaz de diversificar a matriz energética e auxiliar em situações de sobrecarga dos alimentadores de áreas adjacentes. A aplicação deste último caso é importante em regiões que necessitam de energia complementar, mas que não possuem uma área de cobertura disponível para a integração dos sistemas solares FV.

Palavras Chave: Geração fotovoltaica, energia fotovoltaica integrada à edificação, geração distribuída.

ABSTRACT: Grid-connected, building-integrated photovoltaic (BIPV) systems are ideal decentralized power sources for urban areas in sunny countries, generating electricity where it is needed, and making use of already available space (the building envelope), infra-structure (the building's structure and electrical installation), and the locally available sunshine. Environmental concern and the continuously growing energy demand worldwide have contributed to the present surge in interest in BIPV systems. The knowledge of the potential of these decentralized generating systems in supplying electrical power at point of use goes beyond the amount of energy they are able to produce; siting PV plants strategically in urban centers can add capacity to local distribution grids, providing grid-support by shaving load peaks. This research presents a detailed study on the potential of grid-connected BIPV systems in urban areas of two state capitals in Brazil, namely Florianópolis-SC and Belo Horizonte-MG. These two cities show different constructive patterns, energy consumption, solar radiation level and latitude. For the city of Florianópolis two urban sectors were chosen: one residential suburb (horizontal construction profile) and one commercial/central area (high-rise construction profile) and for the city of Belo Horizonte three urban sectors were selected: one commercial/central area (high-rise construction profile) one residential suburb (horizontal construction profile) and the other with varied characteristics. Through the use of the six commercially available PV technologies this study makes a comparative analysis of the performance of this hypothetical PV generator comprised of a group of small PV systems distributed over the buildings rooftops in the correspondent urban centers, considering three possibilities of distribution of the modules: on a horizontal plane, sloped at local latitude tilt and orientated to geographic north, and with the real tilt and orientations of the roofs of each sector. These three studies aimed at quantifying the variation between the real case and the hypothetical roof tilt and orientation cases. It was concluded that the variation between the three cases is significant, thus it is necessary to calculate the potential of the PV generation using the real case. For each sector the respective fraction of energy consumption was quantified and the contribution this generator can offer to the local utility was verified and quantified as a solar fraction, for each case. It was thus possible to identify the influence of the orientation and tilt of the solar modules and the selected PV technology with the climatic conditions of the regions on the performance of the PV system. The two studies showed good results in terms of photovoltaic generation potential and reduction of the load peak. It was possible to observe that the system in each sector can help the utility in different ways: as a power source that can help in the reduction of the grid overload at the point of use, as a small power plant that can diversify the energy mix, and to help in the reduction of the overload in other adjacent urban area. This last case is important in power constrained urban areas which do not have enough available rooftop areas for the integration of PV systems.

Keywords: photovoltaic generation, building integrated photovoltaic, distributed generation.

INTRODUÇÃO

1.1 Introdução.....	04
1.2 Colocação do Problema.....	07
1.3 Objetivos.....	10
1.3.1 Objetivo Geral.....	10
1.3.2 Objetivos Específicos.....	10
1.4 Estrutura do Trabalho.....	11

1.1 INTRODUÇÃO

Segundo Geller (1994), no Brasil mais de 40% da energia elétrica consumida é utilizada por edificações residenciais, comerciais e públicas, sendo o setor residencial responsável por 23 % do total do consumo nacional e os restantes, responsáveis por 11 % e 8 % respectivamente.

A porcentagem de domicílios supridos com eletricidade vem aumentando gradativamente a cada ano, fazendo com que a demanda cresça muito, em curto prazo. Essa demanda mundial tem se expandido rapidamente, devido ao crescimento econômico mundial e ao aumento da população. Aliado a outras causas, isto gerou a necessidade de racionamentos de energia.

Atualmente, as empresas do setor elétrico vêm passando por crises financeiras, principalmente em função das baixas tarifas praticadas. Portanto, aumentar a eficiência energética é uma estratégia para solucionar alguns problemas enfrentados pelas concessionárias, pois a eficiência do uso final reduz a demanda de eletricidade sem diminuir os bens e serviços fornecidos. De uma forma geral, é quase sempre mais barato economizar um kWh do que gerar um kWh.

Representantes do governo, concessionárias de energia e analistas estão estudando novas abordagens para o setor elétrico no Brasil.

Avanços na ciência e tecnologia têm provido várias alternativas de produção de energia a um nível sustentável.

Uma das tecnologias renováveis mais promissoras e recentes de geração de energia é a geração fotovoltaica, que vem sendo cada vez mais utilizada pelos países industrializados. Ela parte do princípio de ser uma fonte silenciosa, estática, não poluente e sem nenhuma depleção de materiais, que converte diretamente a energia do sol em energia elétrica.

A energia solar fotovoltaica tem provido energia elétrica para qualquer aplicação e em qualquer localização na terra e no espaço, sendo que o meio urbano começou a se destacar como um grande absorvedor desta tecnologia ecológica.

Inicialmente, os sistemas de conexão à rede elétrica se desenvolviam somente para centrais fotovoltaicas de grande porte, já que se pensava que poderiam, no futuro, resolver certos problemas existentes na geração e distribuição de energia convencional. A medida em que avançou o mercado da eletrônica, começaram a ser desenhados, também, sistemas de menor porte com a finalidade de atender a pequenas centrais domésticas, que hoje correspondem a mais de 50% do mercado fotovoltaico (ATHANASIA, A. L.; 2000).

Recentemente, os sistemas solares fotovoltaicos têm sido utilizados de forma integrada à rede elétrica pública. Estas instalações podem apresentar duas configurações distintas: instaladas de forma integrada à edificação (no telhado ou fachada) e, portanto próximo ao ponto de consumo, ou de forma centralizada, como em uma usina geradora convencional, neste caso, mais distante do ponto de consumo.

O sistema integrado junto ao ponto de consumo apóia-se na rede, auxiliando na redução do pico de demanda, diminuindo a dependência das fontes convencionais de energia, de forma não poluente e não prejudicial ao meio ambiente. Além disto, dado o caráter complementar da geração hidrelétrica e solar (chuvas = pouco sol e vice versa) a geração solar em grande escala poderia contribuir significativamente para melhor balancear a grande dependência do setor elétrico brasileiro em uma fonte geradora dominante e sazonal como é a geração hidráulica.

Como característica principal, a geração fotovoltaica mostra uma excelente capacidade de trabalho com outras fontes de energia. Suas instalações podem ser encontradas trabalhando com centrais nucleares, hidrelétricas e de todos os tipos.

No passado, eram projetados módulos somente para geração de energia e a estética e integração com o entorno construído eram negligenciadas. Recentemente, arquitetos e engenheiros se depararam com a necessidade de buscarem uma parceria para estudar uma maior integração arquitetônica destes elementos. Assim surge uma maior variabilidade de modelos, tamanhos e cores, tornando-os mais versáteis e possibilitando uma integração com design agradável.

Considerações apontam para elementos construtivos que podem ter a dupla função: gerar eletricidade e funcionar como elemento arquitetônico na cobertura de telhados, paredes, fachadas ou janelas; podem servir como substituição de vidros, mármore ou outros elementos decorativos, diminuindo, assim, o custo final da instalação.

O sistema fotovoltaico tem um grande potencial para o design dos edifícios, tornando-se, possivelmente, um elemento importante não somente para os sistemas construtivos, mas para o meio ambiente. Cada vez mais os países desenvolvidos vêm utilizando este sistema, não somente para uso residencial, mas também em edificações industriais, comerciais e públicas, pois estas muitas vezes apresentam grandes áreas planas, que são bastante adequadas à integração de geradores fotovoltaicos.

A utilização do sistema fotovoltaico tem sido viável em muitos casos onde as exigências mínimas para seu bom funcionamento são cumpridas e em locais onde o custo para geração de energia elétrica é muito alto. Os painéis fotovoltaicos interligados à rede elétrica podem ser integrados a qualquer edificação, sendo o único requisito uma orientação solar favorável (superfícies voltadas para norte, leste ou oeste), sendo que a orientação ideal são as superfícies voltadas para o norte geográfico, no hemisfério sul, pois permitem uma maior captação da energia gerada pelo sol.

No Brasil, a legislação atualmente em vigor e que rege a produção, transmissão e distribuição de energia elétrica já prevê os sistemas solares fotovoltaicos integrados à

edificação urbana e interligados a rede elétrica convencional. A resolução ANEEL 112, de 18 de Maio de 1999, estabelece os requisitos necessários à obtenção de registro ou autorização para a implantação, ampliação ou repotenciação de centrais geradoras termelétricas, eólicas e de outras fontes alternativas de energia, incluindo a fotovoltaica. O registro de implementação, ampliação ou repotenciação de centrais geradoras termelétricas, eólicas, fotovoltaicas e de outras fontes alternativas de energia, com potência igual ou inferior a 5000kW, deverá ser solicitado a ANEEL mediante requerimento, acompanhado de ficha técnica preenchida. (ANEEL, 1999).

1.2 COLOCAÇÃO DO PROBLEMA

A necessidade de aumentar a capacidade brasileira de geração energética é uma questão atual. Tendo em vista que não há mais a mesma disponibilidade de recursos para financiar grandes obras civis, o crescente aumento da importância do meio ambiente e os problemas com relação à oferta e a demanda energética no país, surge a necessidade de buscar novas fontes de energia.

Baseado no fato de que diariamente incide na superfície da terra mais energia vinda do sol do que a demanda total de todos os habitantes de nosso planeta em todo ano (HAMAKAWA, Y; 2002), o sistema solar fotovoltaico visa absorver esta fonte inesgotável de energia e transformá-la em energia elétrica.

Todo o sistema convencional de geração possui problemas como, poluição, dependência de combustíveis ou oposições públicas para seu uso. A estrutura central de geração torna as pessoas vulneráveis a *blackouts* energéticos. A ineficiência elétrica e os sistemas de climatização condicionados desperdiçam grande quantidade de eletricidade; além da geração ser centralizada e distante do ponto de consumo, isso faz com que o sistema gere

perdas na transmissão e distribuição, aumentando os custos da energia e causando danos às concessionárias e ao meio ambiente. (RUTHER, 1999)

O sistema fotovoltaico, além de causar menor dano ambiental, permite a sua utilização em pequena escala e ainda pode ser instalado próximo ao ponto de consumo, de forma distribuída, minimizando as perdas por transmissão e distribuição da geração centralizada. Devido ao fato de serem conectados à rede elétrica pública, essas instalações dispensam os sistemas acumuladores de energia (banco de baterias), utilizados nos sistemas isolados, reduzindo o custo total da instalação e dispensando a manutenção envolvida por um banco de baterias. Estes sistemas independentes envolvem um investimento ainda maior, pelo fato de necessitarem de um super dimensionamento, para garantir energia elétrica durante o ano todo, independentemente dos períodos com menores níveis de radiação.

Os sistemas fotovoltaicos integrados possuem a vantagem de representarem uma usina geradora descentralizada e que não ocupa área física, visto que sua integração com a edificação pode substituir ou se sobrepor a materiais de cobertura ou revestimento. Apresentam não somente vantagens em termos estéticos, pois são incorporados ao design original do projeto, mas vantagens em relação ao custo total da instalação, por substituírem materiais de revestimentos ou recobrimentos.

Instalações solares fotovoltaicas integradas a prédios comerciais de escritórios e interligadas à rede elétrica pública são um exemplo de aplicação ideal destes sistemas, onde os picos de consumo e de geração são muitas vezes coincidentes. A geração solar fotovoltaica atinge valores máximos, principalmente em períodos de calor intenso, onde a demanda energética nestas edificações aumenta de forma acentuada, em consequência da utilização intensa de aparelhos de ar-condicionado, devido a que nestes horários, ocorre uma maior incidência solar. Desta forma, o sistema FV alivia o sistema de T & D (transmissão e distribuição) da concessionária elétrica. Conhecendo a capacidade que uma planta

fotovoltaica tem de gerar energia quando a demanda se eleva, esta pode não apenas servir como uma fonte geradora de energia, mas principalmente como uma planta que aumenta a capacidade da rede elétrica local.

O sistema convencional de geração de energia utiliza, também, combustível fóssil nas usinas, adicionando gases, chuvas ácidas e outros poluentes no meio ambiente. Os sistemas solares fotovoltaicos eliminam muitos destes problemas citados. Ao contrário do sistema convencional, o sistema FV utiliza uma fonte de energia renovável, o sol, e os painéis que convertem esta energia em eletricidade são feitos de silício, sendo este o segundo elemento mais abundante na superfície do planeta (HAMMOND, 1992). Além disso, pode competir em aparência com materiais nobres de revestimento, dando à edificação uma aparência estética inovadora, trazendo uma imagem ecológica associada ao projeto, já que produz energia limpa e de fonte renovável.

Em localidades equatoriais, o sistema FV produz, em média, a mesma quantidade de energia durante todo o ano, porém, à medida que se eleva a latitude local, a maior produção de energia elétrica se efetua no verão, quando o sol está mais alto e os dias são mais prolongados.

Países como a Alemanha, Japão e EUA (maiores mercados fotovoltaicos), têm investido na aplicação do sistema fotovoltaico, mesmo com níveis de radiação solar relativamente baixos. O Brasil, ao contrário destes países, possui latitudes baixas e altos níveis de radiação solar, fazendo com que uma maior quantidade de energia seja absorvida. Outro fator importante é que no Brasil a densidade de ocupação do solo é menor com relação aos países industrializados; isto torna maior o espaço físico disponível para aplicação do sistema FV, além de diminuir o percentual de sombreamento principalmente por edificações vizinhas.

Com todos estes aspectos mencionados, conclui-se que o Brasil tem melhores condições físicas e climáticas para a utilização do sistema que o restante citado. Portanto, se na Europa esta aplicação é realizada com sucesso, também no Brasil há condições de aplicar a energia FV com um nível maior de aproveitamento, em função da maior disponibilidade de espaço físico e de radiação solar.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

A presente pesquisa tem por objetivo estimar o potencial de contribuição, no suprimento de energia de uma determinada região, através de sistemas FV instalados em toda a área útil de cobertura das edificações.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar a utilização de uma fonte de energia renovável e próxima do ponto de consumo, de forma integrada ao entorno construído;
- Analisar o consumo elétrico de cada setor urbano estudado;
- Analisar os níveis de radiação solar, bem como orientação mais favorável, de forma a maximizar a quantidade de energia gerada pelo sol, em função da área disponível para a utilização do sistema FV;
- Verificar se a área de cobertura dos setores urbanos escolhidos é suficiente para a instalação de um sistema fotovoltaico que supra as necessidades de consumo de energia elétrica das edificações do local;
- Comparar o horário de pico de demanda com o horário de geração FV em cada área estudada;

Apesar de ser de extrema importância, este último item foi abordado apenas de forma parcial, pois uma análise mais aprofundada fugiria do objetivo principal deste trabalho.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos: capítulo 1. Introdução, capítulo 2. Revisão Bibliográfica, capítulo 3. Metodologia, capítulo 4. Resultados e Discussão e capítulo 5. Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros.

Na introdução é mostrada uma prévia apresentação do que é um sistema de energia solar fotovoltaica, da atual situação energética do país e da importância do assunto abordado.

No capítulo dois, faz-se uma abordagem desde a evolução do consumo de energia elétrica, gerenciamento pelo lado da demanda (GLD), impactos sociais e ambientais, a energia fotovoltaica, aspectos tecnológicos dos painéis, aspectos ambientais, sustentabilidade e eficiência energética, viabilidade econômica até os programas de incentivo para a implementação dos sistemas solares fotovoltaicos. Esta revisão utilizou as referências dos principais autores encontrados na literatura.

No capítulo três é proposta uma metodologia para verificação do potencial de geração de energia solar fotovoltaica em áreas urbanas.

O capítulo quatro relata e discute os resultados obtidos no estudo de verificação do potencial de geração solar em dois setores urbanos de cada uma das duas cidades analisadas: Florianópolis/SC e Belo Horizonte/MG.

No capítulo cinco é apresentada a conclusão final do estudo realizado e são feitas sugestões para a realização de trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução.....	13
2.2 Evolução no Consumo de Energia Elétrica e Perspectivas.....	13
2.3 Gerenciamento pelo Lado da Demanda.....	15
2.4 Impactos Sociais e Ambientais.....	15
2.5 A Energia Fotovoltaica.....	17
2.6 Tecnologias Disponíveis.....	24
2.6.1 Silício Mono Cristalino (m-Si) e Silício Poli Cristalino (p-Si).....	26
2.6.2 Silício Amorfo Hidrogenado (a-Si).....	27
2.6.3 Telureto de Cádmio (CdTe).....	28
2.6.4 Disseleneto de Cobre e Índio (CIS).....	29
2.6.5 HIT.....	30
2.7 Aspectos Ambientais.....	31
2.8 Sustentabilidade e Eficiência Energética.....	32
2.9 Viabilidade Econômica.....	33
2.10 Programas de Incentivo.....	36
2.11 Conclusão.....	41

2.1 INTRODUÇÃO

O presente estudo, faz uma abordagem geral sobre as questões energéticas e os problemas ambientais causados pela aceleração global da demanda energética em um curto prazo. Por outro lado, apresenta como alternativa para contribuir na solução de alguns problemas enfrentados por esta aceleração, a utilização de uma fonte alternativa renovável de energia, a geração fotovoltaica, apresentando suas características, de forma a tornar visíveis seus benefícios tanto energéticos quanto ambientais.

2.2 EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA E PERSPECTIVAS

A demanda mundial de energia vem crescendo continuamente. Em parte, isto acontece porque as populações e suas necessidades vêm crescendo e mais indústrias, serviços e empregos são gerados. Além destes fatores, uma parcela desta demanda é gerada pelo desperdício de energia. Com base nisso, os países estão buscando estratégias que aumentem, cada vez mais, a eficiência energética das concessionárias.

Dados fornecidos pelo MME (2001), indicam que o consumo de energia não está ligado apenas ao crescimento econômico. O crescimento da população e a maior inserção de camadas pobres da população ou novas áreas geo econômicas na chamada economia de mercado, induzem a aumentos no uso de energia, mesmo em anos de pequeno desenvolvimento econômico.

Conforme comentam Martins et al (1999), o crescimento do consumo de energia elétrica no Brasil vem apresentando sustentada evolução nos últimos anos, implicando em taxas anuais de expansão significativamente superiores ao crescimento da economia e da própria demanda energética.

Knijnik (1994), comenta que a disponibilidade de energia não mais corresponde à demanda imposta pela estrutura espacial da vida urbana, o que implica num período de adaptação. O autor ressalta que estamos entrando num período de redução de possibilidades energéticas, principalmente das originadas do petróleo, a qual é a fonte de energia atual polivalente.

Este aumento no uso de energia também se deve ao fato de que o preço das tarifas energéticas nos últimos anos permaneceu estagnado ou em baixa. (MME, 2000). Isso gerou um aumento na utilização de eletrodomésticos pelas famílias.

Após o ano de 2025, a população mundial atingirá 8 bilhões de pessoas (era de 4 bilhões no início da década de 80) e cerca de 70% desta população estará nas áreas urbanas. (KNIJNIK, 1994)

A geração de energia elétrica convencional é centralizada e distante do ponto de consumo; isso faz com que o sistema gere perdas na transmissão e distribuição, aumentando os custos da produção da energia e causando danos às concessionárias e ao meio ambiente.

Por outro lado, conforme relata Rodrigues (2002), a geração distribuída oferece inúmeras vantagens ao setor elétrico, uma vez que a disposição da unidade de geração é próxima da carga, além disso, permite uma maior diversificação das tecnologias empregadas para a produção de energia.

Devido a estes fatores, aumentar a eficiência energética é uma estratégia para solucionar alguns problemas enfrentados pelas concessionárias, pois a eficiência do uso final reduz a taxa de crescimento da demanda de eletricidade, sem diminuir os bens e serviços fornecidos. A ineficiência elétrica e os sistemas de climatização desperdiçam grande quantidade de eletricidade e são um dos maiores responsáveis por este aumento do consumo energia.

2.3 GERENCIAMENTO PELO LADO DA DEMANDA

De um modo geral, o gerenciamento pelo lado da demanda (GLD) diz respeito ao planejamento, à implementação e ao acompanhamento daquelas atividades que modificam a curva de carga dos consumidores.

A utilização da energia elétrica gerada por sistemas fotovoltaicos, em alguns casos, onde as curvas de carga e de geração fotovoltaicas são coincidentes, pode auxiliar na redução do pico de consumo, sendo assim, pode servir como uma alternativa de GLD.

Os programas de GLD afetam o uso da demanda e energia dos consumidores através de vários mecanismos. Um deles é a variação do valor de tarifas ao longo do dia, sinalizando que o custo de produção de energia elétrica não é uniforme, existindo períodos em que ele é mais caro (ponta do sistema) e horas em que é mais barato (fora de ponta). Esta estrutura tarifária procura induzir o usuário a fazer o consumo maior de energia nos períodos antes e depois do período de ponta, conforme relatam Borenstein e Camargo (1997).

2.4 IMPACTOS SOCIAIS E AMBIENTAIS

Borenstein e Camargo (1997) comentam que as necessidades de energia elétrica, advindas da sociedade moderna, e os altos custos provenientes do não suprimento desta energia, colocam as concessionárias diante da opção de aumentar a oferta mediante a construção de novas fontes de geração e as obras de transmissão e distribuição correspondentes. Por outro lado, os autores avaliam as restrições de ordem financeiras, ambientais e sociais, pois as grandes obras de geração e transmissão, necessárias face às imposições da economia de escala, resultam na utilização de grandes extensões territoriais para gerar e transmitir energia elétrica.

Os sistemas solares fotovoltaicos integrados à edificação e interligados à rede elétrica estariam auxiliando na redução deste grande impacto ambiental, causado pela devastação de áreas para a implementação de grandes obras de geração de energia.

Segundo o RELATÓRIO DO BRASIL PARA A CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO (1991), a matriz energética no Brasil indica que a maior parte da energia elétrica é proveniente de usinas hidrelétricas. Dessa forma, a contribuição do país para o chamado “efeito estufa” é proveniente do desmatamento e da utilização dos derivados de petróleo. O estudo constata que houve um aumento da concentração de CO₂ na atmosfera de 25% com relação à era pré-industrial.

Isso mostra que o consumo de energia elétrica traz, de certa forma, algum tipo de dano ambiental, principalmente na sua exploração.

Borenstein e Camargo (1997) ainda complementam que no Brasil, além das dificuldades enfrentadas para financiar novos empreendimentos no setor de energia elétrica, os crescentes movimentos sociais e ecológicos contra a construção de grandes obras de geração e transmissão de energia elétrica tornam claro que a qualidade no suprimento de energia elétrica vem se deteriorando paulatinamente.

Experiências dos Estados Unidos (HAMAKAWA, 2002) e de outros países desenvolvidos têm demonstrado que, em longo prazo, a prevenção da poluição através da diminuição de resíduos e de uma produção com tecnologias mais limpas e eficientes, é mais sensata, tanto na relação custo benefício, como também para o próprio meio ambiente, se comparado com tecnologias tradicionais.

Dados da ELETROBRÁS/PROCEL (2001) relatam que as reservas de combustíveis fósseis de boa qualidade no Brasil não são grandes e que as reservas de petróleo são avaliadas como suficientes para 22 anos. O potencial hidrelétrico do Brasil, aproveitando somente 23%,

tem sua maior capacidade na região amazônica, onde a inundação de enormes áreas para a construção de reservatórios das hidrelétricas poderia trazer como resultado uma catástrofe ambiental.

Aliado a estes fatores surge, cada vez mais, a necessidade da utilização de uma fonte renovável de energia, de forma não poluente e sustentável.

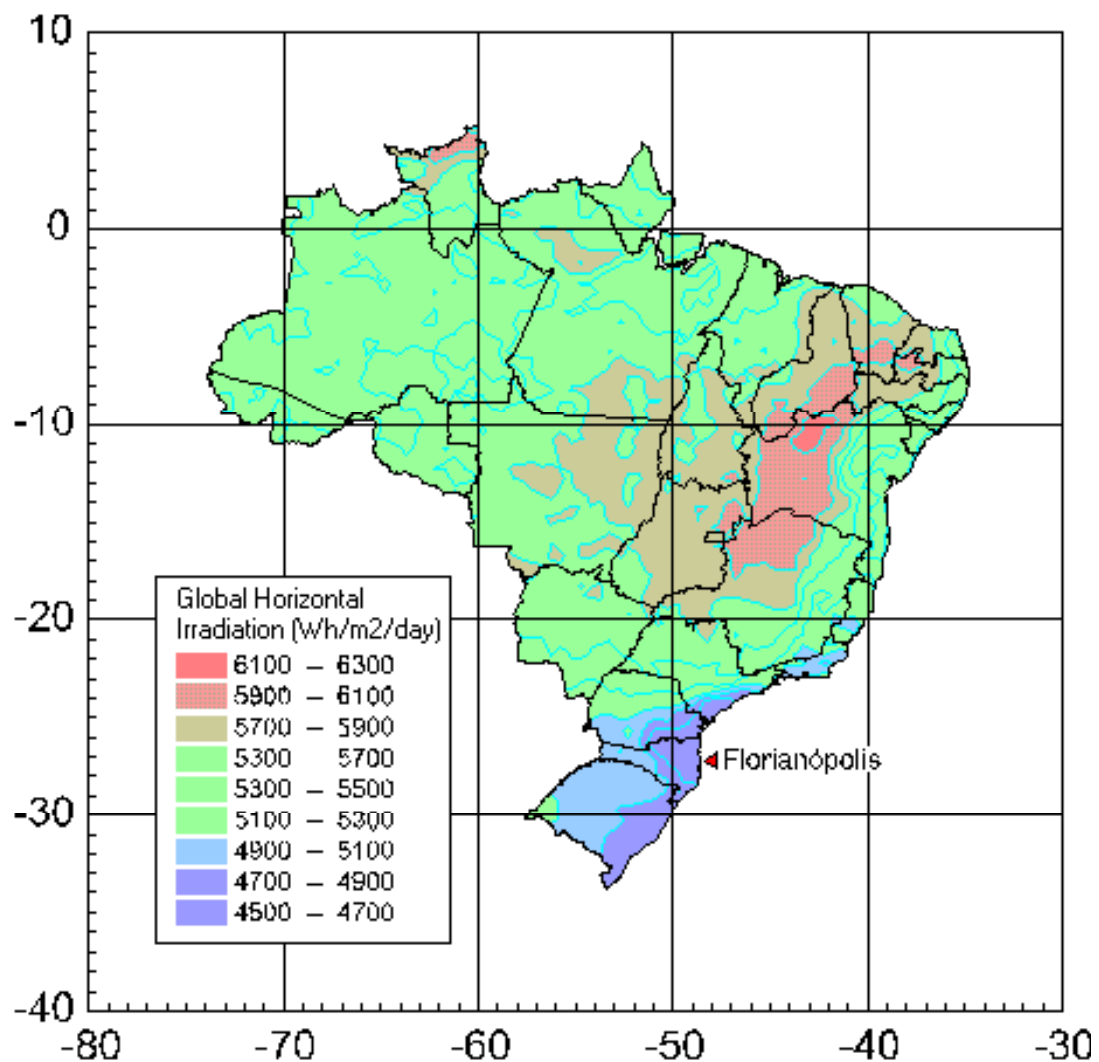
2.5 A ENERGIA FOTOVOLTAICA

Uma das tecnologias renováveis mais promissoras e recentes de geração de energia elétrica é a fotovoltaica, que gera eletricidade de forma distribuída, característica que se diferencia da forma como se constitui o setor elétrico brasileiro.

A geração fotovoltaica representa uma solução sustentável, uma vez que o material ativo na maioria dos módulos é o silício, que conforme Hammond (1998), é o segundo elemento mais abundante na superfície terrestre.

Segundo Hamakawa (2002), o total de irradiação incidente na terra é de 1.2×10^{14} kW, isso corresponde a 10 000 vezes mais do que a demanda mundial em todo ano de 2002.

A figura 1 representa o Atlas solarimétrico do Brasil, onde é possível observar as médias diárias anuais de irradiação no País (em Wh/m^2) e identificar as regiões que possuem maiores níveis de incidência solar.



Fonte: Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina.

Figura 1: Atlas solarimétrico do Brasil.

Com base nestas informações, é possível observar que a conversão direta da irradiação do sol em eletricidade tem um número significativo de vantagens. Além utilizar uma fonte renovável e abundante de energia, o sistema é silencioso, estático e sem nenhuma depleção de materiais, que converte diretamente a energia do sol em energia elétrica, e que vem sendo, cada vez mais, utilizado por países industrializados.

A grande parte dos geradores FV integrados às edificações está localizada em países desenvolvidos, com altas latitudes e temperaturas frias, tendendo a diferentes níveis de

radiação e temperatura de operação dos módulos se comparado com a operação em climas quentes e equatoriais como o Brasil. (RÜTHER e MONTENEGRO, 2001)

Os sistemas FV apresentam duas configurações distintas: isolados ou autônomos e conectados à rede elétrica. A diferença entre eles destaca-se pela existência ou não de um sistema acumulador de energia.

Conforme Rüther (2004), os sistemas autônomos se caracterizam pela necessidade de um banco de acumuladores químicos (baterias), onde a energia gerada pelos painéis solares é armazenada e distribuída aos pontos de consumo. Esse é o tipo de sistema atualmente competitivo, economicamente, com formas mais convencionais de geração. Sistemas autônomos são normalmente utilizados quando o custo de estender a rede elétrica pública for proibitivo, ou quando o local for de difícil acesso. Os sistemas interligados à rede elétrica, por outro lado, dispensam o uso de acumuladores, pois atuam como usinas geradoras de energia elétrica em paralelo às grandes centrais geradoras. Podem ser integrados à edificação, se sobrepondo ou substituindo elementos de revestimento e, portanto, próximo ao ponto de consumo; ou do tipo central fotovoltaica, sendo esta, distante tipicamente do ponto de consumo.

Eiffert e Kiss (2000) comentam que a integração dos painéis fotovoltaicos com a edificação apresenta vantagens de custos que torna este conceito atrativo tanto para regiões urbanizadas tanto para regiões menos densamente populosas. O sistema pode ser implementado nas edificações, ao longo de estradas ou em áreas terrestres, com a possibilidade de combinar produção de energia com outra função da edificação.

A figura 2 corresponde a um esquema de sistema solar fotovoltaico integrado na cobertura de uma edificação residencial e interligado na rede elétrica.

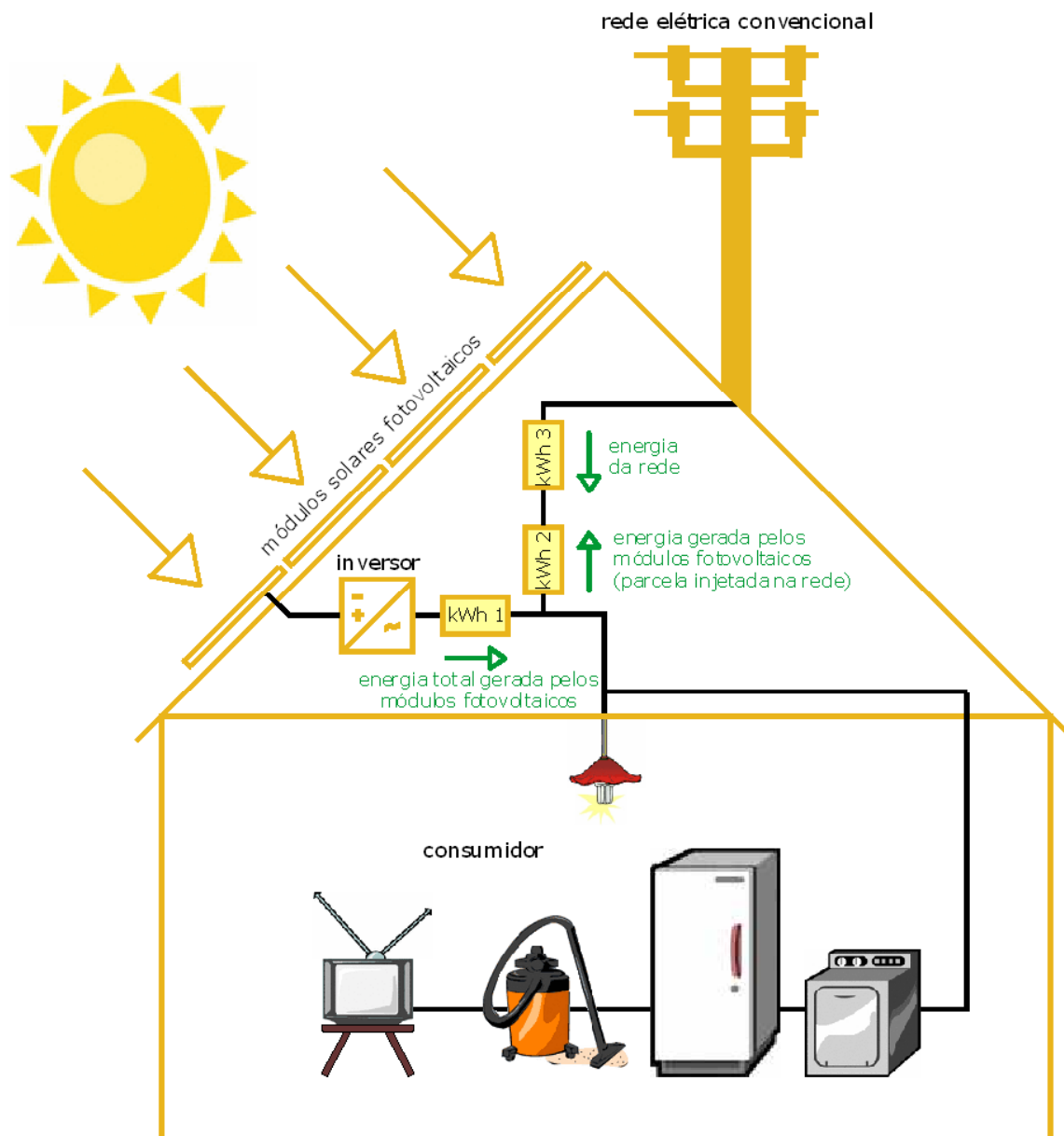


Figura 2: Diagrama esquemático de um sistema solar fotovoltaico integrado à edificação e interligado à rede elétrica.

Em sistemas fotovoltaicos residenciais interligados à rede elétrica, sempre que o sistema gerar energia em excesso em relação ao consumo da residência, este excesso é injetado diretamente na rede elétrica pública (*net metering* = o relógio medidor de consumo “anda para trás”; a residência está “vendendo” energia para a rede). Quando o sistema fotovoltaico gera menos energia do que a necessária para atender à demanda da residência

(períodos de elevado consumo elétrico, ou baixa incidência solar, ou à noite), então a energia complementar necessária é extraída da rede.

Sick et al (1996), definem vários fatores que podem influenciar no rendimento dos painéis, como a radiação solar, que depende fundamentalmente da localização geográfica da instalação, de condições climáticas, bem como de sua inclinação e orientação. A temperatura dos painéis, o sombreamento parcial, as resistências dos condutores e o estado de limpeza dos painéis também influenciam a performance do sistema gerador fotovoltaico. O autor afirma que a orientação ideal para a colocação do painel é a da superfície voltada para o equador com inclinação da latitude local; as fachadas voltadas para leste ou oeste (no Brasil) também podem ter performances satisfatórias mesmo quando instaladas em ângulos inclinados ou na vertical, com rendimentos da ordem de 60% em relação a uma orientação ótima, devido ao baixo ângulo do sol no início e final do dia.

Vários fatores podem influenciar no rendimento dos módulos FV. Segundo Rüther (2004), os efeitos da inclinação e orientação dos módulos no rendimento do gerador dependem da razão entre a radiação direta e difusa local, bem como a fração de albedo, que é característica do ambiente que circunda a região. O sombreamento também é visto como uma questão crítica, pois um gerador FV apresenta uma performance ideal quando iluminado homogeneamente.

Os módulos são projetados e fabricados basicamente para o uso ao ar livre; todos os produtos são satisfatórios para a exposição ao sol, chuva e outros agentes climáticos, devendo operar satisfatoriamente nestas condições por períodos de 30 anos ou mais. O sistema de fixação à edificação deve suportar todas as cargas mecânicas e ventos, bem como as expansões e contrações térmicas. Estas circunstâncias tornam possível o uso de módulos PV como parte do envelope da edificação.

A aplicação do sistema fotovoltaico é maior nos países desenvolvidos e é realizado com bastante sucesso, mesmo com níveis de irradiação solar relativamente baixos. Segundo Rüther (2004), a iluminação difusa nestas localidades é intensa e isto faz com que a inclinação do painel não seja um aspecto tão condicionante. Ao contrário do Brasil, cujas latitudes são baixas e as temperaturas variam. No hemisfério sul existe um predomínio de dias ensolarados, fazendo com que uma maior quantidade de energia, sob a forma de radiação direta, seja absorvida. Outro fator importante é que no Brasil a densidade é menor com relação aos países industrializados e o espaço físico para aplicação do sistema torna-se maior.

Com todos estes aspectos mencionados, conclui-se que o Brasil tem melhores condições físicas e climáticas para a utilização do sistema que o restante citado. Portanto, se na Europa esta aplicação é realizada, também temos condições de aplicá-lo aqui e com um nível maior de aproveitamento, em função da disponibilidade da radiação solar.

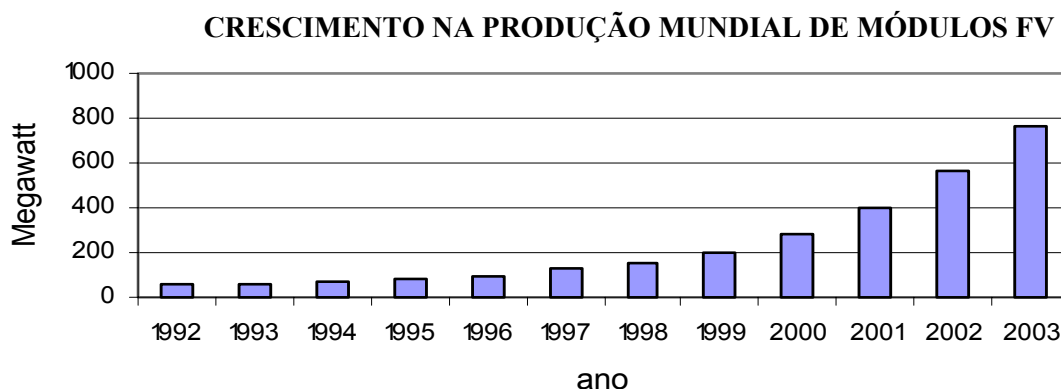
Woyte et al (2003) comentam que em países industrializados os sistemas fotovoltaicos interligados à rede são, principalmente, instalados em edifícios. A integração destes sistemas com o ambiente construído oferece um grande potencial para a redução de custos, tanto da concessionária quanto da construção, além de poder ser considerada de grande valor para a arquitetura urbana.

Oliveira (2002) relata que a energia elétrica proveniente de fontes renováveis de pequena escala é vista como opção, em diferentes níveis, por diversos países. Dentre eles a Alemanha, Espanha, Japão e Estados Unidos. No Brasil a discussão da inserção dessas fontes ainda é muito carente e necessita de uma abordagem mais aprofundada. Nos últimos dez anos, a aplicação dominante da tecnologia passou dos sistemas fotovoltaicos isolados para os pequenos geradores fotovoltaicos, conectados à rede; primeiramente a partir de grandes centrais e posteriormente, de forma distribuída, através de sistemas menores.

Segundo Woyte et al (2003) as experiências com painéis fotovoltaicos na edificação tornaram-se mais profundas e disponíveis em 1990, com o início do 1000- Roofs-PV-Programme, programa alemão de incentivo à tecnologia.

Os sistemas solares vêm tomando impulso crescente no mercado energético. Segundo Green (2003), a indústria fotovoltaica vem crescendo de 30-40%/ano, desde 1996 com os subsídios governamentais e programas de incentivo.

A figura 3 relata o crescimento da produção anual mundial de painéis solares fotovoltaicos, do ano de 1992 até 2003, conforme PV News (2004).



Fonte: PV NEWS, 2004.

Figura 3: Desenvolvimento do mercado Fotovoltaico mundial nas últimas décadas em megawatt por ano.

A tecnologia fotovoltaica é vista por muitos, como um caminho ideal para a geração de energia, através de uma fonte inesgotável e não poluente. É um método de produção de energia sustentável e amigável ao meio ambiente, trazendo benefícios tanto ambientais quanto energéticos.

Eiffert e Kiss (2000), comentam que em áreas densamente populosas como a maior parte da Europa, Japão e US, a realização de sistemas em grande escala só será possível através de sistemas fotovoltaicos distribuídos no ambiente urbano.

Aliado a outra fonte geradora de energia, como por exemplo à hídrica, o sistema poderá tornar-se uma opção viável para prover o mix energético.

2.6 TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS

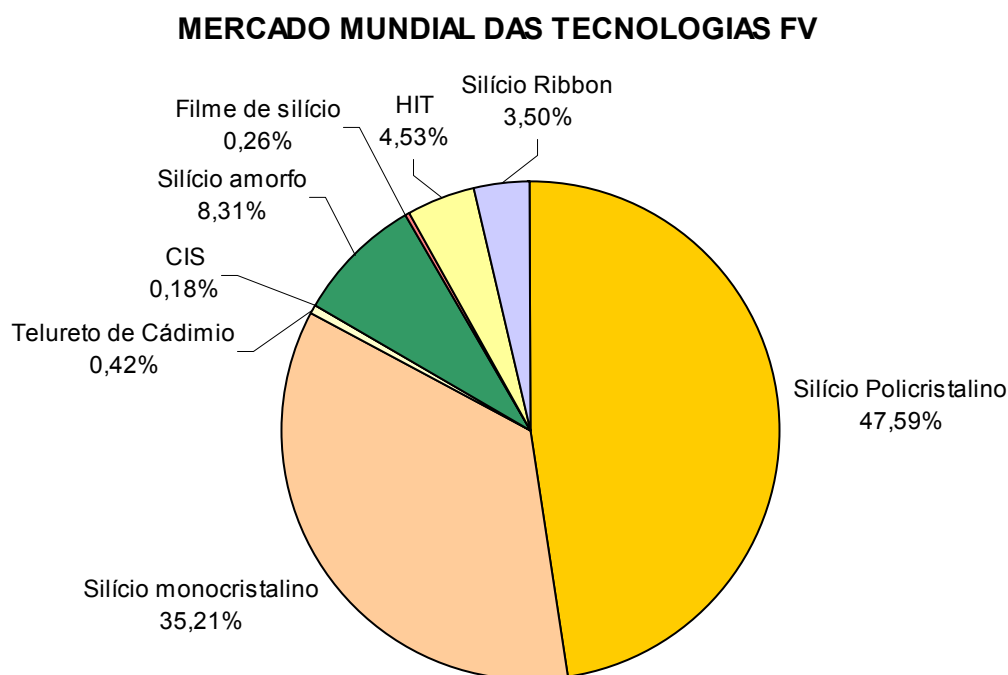
O mercado fotovoltaico vem crescendo a cada dia, e cada vez mais os sistemas vêm sendo utilizado de forma integrada à edificação. Com isso, surge a necessidade de novos modelos, com diferentes materiais e colorações.

Uma profunda variedade de sistemas fotovoltaicos integrados à edificação encontra-se disponível no mercado de hoje. Conforme Eiffert e Kiss (2000), a maioria delas pode ser agrupada em duas categorias principais: sistema de fachada e sistema de cobertura. Nos sistemas de fachada estão incluídos elementos de revestimentos de parede, painéis para vãos e vidros. Sistemas de coberturas incluem telhados e iluminações naturais nas coberturas. Portanto, é uma tecnologia de instalação de energia renovável que apresenta grande vantagem, principalmente em áreas urbanas onde não há área de terra disponível ou esta é bastante custosa.

Atualmente, existem no mercado várias tecnologias fotovoltaicas, baseadas em diferentes elementos.

Em termos de aplicações terrestres destacam-se as células solares de silício cristalino (c-Si), o silício amorfo hidrogenado (a-Si:H ou a-Si), o HIT, baseado em silício cristalino com uma camada de silício amorfo, o telureto de cádmio (CdTe) e outros compostos relacionado ao cobre e índio, CIS. Neste último grupo, segundo Ruther e Montenegro (2001), aparecem elementos altamente tóxicos e raros. Este fator fez com que surja um obstáculo considerável na utilização mais acentuada destas tecnologias em alguns países.

Dentre os modelos mencionados, os que possuem maior utilização são os painéis de silício cristalino (poli ou mono cristalino) e os de silício amorfo.



Fonte: Goetzberger et al, 2002.

Figura 4: Mercado mundial das diferentes tecnologias fotovoltaicas, em 2001.

Conforme Rüther e Montenegro (2001) o c-Si é a tecnologia mais tradicional e a única das mencionadas que faz o uso de lâminas cristalinas, relativamente espessas, o que aumenta os custos de produção. O restante das tecnologias é baseado em películas delgadas (filmes finos) de material semicondutor, aspecto que reduz os custos desta tecnologia. A tecnologia baseada em c-Si, dentre as utilizadas para aplicações terrestres é a que apresenta maior eficiência, em torno de 15% para módulos FV comercialmente disponíveis. As tecnologias de filmes finos, sendo inerentemente menos eficientes e também por estarem ainda na infância de seu desenvolvimento, têm um rendimento ao redor de 8% para painéis comerciais, o que significa que se necessita de aproximadamente o dobro da área em painéis solares de filmes finos para obter a mesma energia fornecida pelos painéis de c-Si.

2.6.1 Silício mono cristalino (m-Si) e silício poli cristalino (p-Si)

Rüther (2004), define a tecnologia c-Si como a mais tradicional e dominante no mercado FV. Além de a tecnologia apresentar uma maior limitação em termos de redução de custos de produção, não é considerada tão eficiente quando submetida a temperaturas altas, pois a eficiência está diretamente relacionada com a temperatura.

A perda de rendimento do sistema fotovoltaico com o aumento das temperaturas tem sido profundamente discutida. Cada vez mais, pesquisadores estão estudando o melhor design do sistema para evitar este super aquecimento. Segundo Bazilian (2001), as células monocristalinas e policristalinas têm coeficientes de temperaturas negativos de aproximadamente $-0.4\%/^{\circ}\text{C}$.

A tecnologia do c-Si ainda é a mais tradicional, apresentando maior escala de produção a nível comercial. Ela possui maior eficiência e se consolidou no mercado pela sua confiabilidade e robustez, mas segundo Rüther (2004), as possibilidades de redução do seu custo já foram praticamente esgotadas.

Rüther (2004) ainda complementa que as células fotovoltaicas de silício monocristalino (m-Si), o monocristal é “crescido” a partir de um banho de silício fundido de alta pureza ($\text{Si}=99,99\%$ a $99,9999\%$) em reatores sob atmosfera controlada e com velocidades de crescimento do cristal extremamente lentas (da ordem de cm/hora). Sendo que as temperaturas envolvidas são da ordem de 1400°C . O silício policristalino (p-Si) apresenta menor eficiência de conversão, tendo também mais baixo custo de produção, já que a perfeição cristalina é menor que no caso do c-Si e o processamento mais simples. O material de partida é o mesmo que para o m-Si, que é fundido e posteriormente solidificado direcionalmente, o que resulta num cristal com grande quantidade de grãos ou cristais, no contorno dos quais se concentram os defeitos que tornam este material menos eficiente do que o m-Si em termos de conversão fotovoltaica.

Poponi (2003) comenta que a possibilidade de a tecnologia fotovoltaica atingir níveis de custos menores, antes do final desta década, pode ser relacionado à penetração do mercado dos módulos de filmes finos. Portanto é indicado que o mercado competitivo dos filmes finos seja realizado antes mesmo do que o usualmente previsto para os módulos de silício cristalino.

Pesquisas estão sendo feitas para aumentar a eficiência dos painéis baseados em filmes finos, a fim de que, no futuro, sejam competitivos, em termos de eficiência, com os modelos baseados em silício cristalino.

2.6.2 Silício Amorfo Hidrogenado (a-Si)

No início dos anos 80 a tecnologia de a-Si era vista como a única tecnologia fotovoltaica em filmes finos (películas delgadas) comercialmente viável.

A produção da tecnologia dos filmes finos difere significativamente da dos módulos de silício cristalino, além de ter uma eficiência consideravelmente menor.

Conforme Alsema (2002), os módulos são baseados no depósito de uma fina camada (0.5-10 μ m) de um material semicondutor em um substrato, usualmente uma lâmina de vidro. São, basicamente o mesmo produto que os painéis de vidro, revestidos por películas comumente utilizados pela construção civil. Dessa forma, esteticamente podem substituir o vidro comum na edificação e apresentar uma variabilidade e uma flexibilidade maior do que os módulos baseados em c-Si.

Alsema (2002) ainda complementa que o recorde de eficiência em células de a-Si individuais em laboratório é inferior a 15% e os melhores módulos de a-Si disponíveis no mercado estão na faixa de 8-9%. Em algumas aplicações arquitetônicas como material de revestimento é que o a-Si leva grande vantagem sobre o c-Si, pois o custo por m², e não o custo por Wp, é a grandeza de interesse e neste aspecto já hoje o a-Si tem custo inferior à metade do custo do c-Si. O a-Si apresenta uma característica que a princípio se mostrou uma

limitação para esta tecnologia. Painéis de a-Si sofrem um decréscimo intrínseco, mas reversível, em sua performance que se estabiliza após um declínio em eficiência de ~15 a 20%. Desta forma, logo que adquirido, um painel solar de a-Si apresenta uma performance superior à especificada para o produto. Após aproximadamente um ano em operação é que a performance estabiliza nos níveis da garantia do produto.

As células de silício amorfo têm coeficientes de temperatura, sobre a potência, nulos após a estabilização do material (RÜTHER et al, 2004), ou seja, esta tecnologia é inerte à temperatura de operação, o que a torna atraente para aplicações integradas à edificação, onde a temperatura dos módulos FV pode chegar a 100⁰C (RÜTHER et al, 1996). Outro benefício é que este material pode ser depositado diretamente sobre grandes superfícies e com uma variedade de substratos.

A tecnologia de filmes finos vem sendo cada vez mais utilizada, principalmente na integração do entorno construído, por apresentar uma maior diversidade de modelos e por possuir baixos custos de produção. Hoje, estão disponíveis no mercado módulos flexíveis, inquebráveis, mais leves, semitransparentes, ou até mesmo com superfícies curvas, que podem substituir elementos de revestimento na edificação.

Estudos realizados por Rüther (2001), relatam que uma excelente performance tem demonstrado que os módulos de a-Si são uma boa escolha de tecnologia para sistemas interligados, integração com a edificação e utilização em climas quentes como no Brasil.

2.6.3 Telureto de Cádmio (CdTe)

Comercialmente disponível para produtos há quase uma década, para aplicações em calculadoras, a tecnologia CdTe é a recente competidora das tecnologias c-Si e a-Si. Estes módulos, também na forma de filmes finos, normalmente sob a forma de placas de vidro num tom marrom/azul escuro, apresentam um atrativo estético em comparação ao c-Si e as

empresas envolvidas com esta tecnologia vêm buscando as aplicações arquitetônicas como um nicho de mercado enquanto desenvolvem seu produto, ampliam seus volumes de produção e reduzem custos.

Segundo Rütther (2004), assim como no caso do a-Si, os custos de produção do CdTe são atrativamente baixos para produção em grande escala e esta tecnologia tem ótimas chances de despontar como um sério competidor no mercado fotovoltaico para a geração de potência elétrica. A relativamente baixa abundância dos elementos envolvidos e sua toxicidade são aspectos que têm de ser levados em conta, principalmente se esta tecnologia atingir quantidades significativas de produção. Com o recorde de eficiência de células individuais de pequenas áreas em laboratório ao redor de 16%, módulos solares encontrados no mercado internacional apresentam eficiência entre 7% e 9%.

Assim como a tecnologia baseada em c-Si, esta tecnologia possui coeficientes de temperatura, sobre a potência, negativos, que conforme Nann e Emergy (1992) são da ordem de $-0,20\%/^{\circ}\text{C}$, havendo desta forma, uma redução de eficiência do sistema fotovoltaico com o aumento das temperaturas.

2.6.4 Disseleneto de Cobre e Índio (CIS)

Outros competidores no mercado fotovoltaico no futuro próximo são os compostos baseados no disseleneto de cobre e índio (CuInSe_2 , ou simplesmente CIS), principalmente por seu potencial de atingir eficiências relativamente elevadas.

Conforme Rütther (2004), células de CIS de pequenas áreas produzidas em laboratório apresentam no momento eficiências em torno dos 18%, com eficiências ao redor de 9 - 10% para os módulos de grande área, comercialmente disponíveis.

Assim como as tecnologias baseadas em a-Si e CdTe, apresentam uma excelente aparência estética, permitindo diversas aplicações arquitetônicas. Como no caso do CdTe, a

pouca abundância dos elementos envolvidos e sua toxicidade são aspectos que têm de ser considerados.

Segundo estudos realizados por Nann e Emery (1992) esta tecnologia apresenta coeficientes de temperatura, sobre a potência, negativos na ordem de $-0,45\%/^{\circ}\text{C}$, havendo desta forma, uma redução na eficiência do sistema fotovoltaico com o aumento das temperaturas maior do que a para o restante das tecnologias.

2.6.5 HIT

A mais nova tecnologia FV disponível no mercado, desenvolvida pela empresa japonesa Sanyo é a tecnologia HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer), que utiliza avançadas técnicas de produção. A tecnologia é baseada em células cristalinas com camadas ultrafinas de silício amorfo, que conforme Sangyo (2002) apresenta os maiores percentuais de eficiência de conversão e até o momento, seus custos são maiores, se comparados com as outras tecnologias.

Segundo pesquisas realizadas pela SANYO (2004), esta nova tecnologia, que combina a eficiência do silício cristalino com as características de temperatura do silício amorfo, pode prover uma potência 10% maior nas condições de altas temperaturas, além de oferecer um aumento de 36% na potência anual se comparado com os módulos de silício cristalino para a mesma área de cobertura.

Durante a produção, as células HIT requerem uma temperatura de 200°C para a formação do processo de junção, valor significativamente menor se comparado com as células convencionais, que requerem uma temperatura de 900°C . Em adição, as células HIT são 200 micrometros mais finas do que as outras tecnologias, utilizando menos silício do que as tecnologias convencionais (SANYO, 2004).

Conforme a SANYO (2004), a tecnologia apresenta coeficientes negativos na ordem de $-0,33\%/^{\circ}\text{C}$, havendo desta forma, uma diminuição na eficiência do sistema em função do aumento das temperaturas.

2.7 ASPECTOS AMBIENTAIS

Hoje em dia, o ser humano vem enfrentando sérios problemas com relação às questões ambientais, tais como o aquecimento global e as chuvas ácidas, que são causadas principalmente pelo consumo em massa de combustíveis fósseis.

Pearce (2002) comenta que em dezembro de 1997, no International Climate Summit em Kyoto, Japão, nações assinaram um protocolo de intenções concordando em reduzir a emissão de gases tóxicos numa média de 5% dos níveis de 1990 entre os anos de 2008 e 2010. O acordo realizado fez com que diversos países buscassem novas fontes de energia não poluentes, ajudando no desenvolvimento e utilização da energia fotovoltaica, que não contribui para a emissão de gases durante o seu uso.

A fabricação dos módulos, bem como a segurança e preocupação com o meio ambiente, segundo Fthenakis (2000), foram o foco de numerosos estudos do Brookhaven National Laboratory sob patrocínio dos US Department of Energy's National Photovoltaic Program, um dos cuidados ambientais adotados foi a necessidade de controles rigorosos de materiais e efluentes, durante a produção, para proteger os trabalhadores e a comunidade local.

Esta preocupação também se deve ao fato de que, hoje em dia, muitos consumidores estão relutando na compra de produtos que contenham materiais que tragam danos à saúde.

2.8 SUSTENTABILIDADE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O primeiro degrau fundamental em qualquer aplicação do sistema fotovoltaico interligado à rede elétrica e integrado à edificação, conforme relatam Eiffert e Kiss (2004) é maximizar a eficiência energética através da carga ou demanda das edificações. Os sistemas de cobertura ou de fachada podem prover *R- Value* para diminuir a transferência térmica. Janelas, coberturas transparentes e fachadas podem ser projetadas para aumentar a iluminação natural no interior dos espaços.

A pesquisa integrada da conservação de energia, eficiência energética, design do envelope da edificação e tecnologia fotovoltaica, maximiza a economia de energia e cria novas oportunidades para o uso de sistemas fotovoltaicos integrados na edificação.

Segundo Bazilian (2001), a iluminação é uma das maiores fontes de energia utilizada na maioria dos prédios comerciais. Os módulos são facilmente adaptados para a transmissão da luz natural, reduzindo assim este consumo. Além disso, a utilização dos módulos como elementos de sombreamento têm obtido grande sucesso, uma vez que controla a passagem excessiva de calor e iluminação no ambiente, minimizando os custos adicionais para sombreamentos e minimizando o consumo de energia em aparelhos condicionadores de ar.

Conforme comentam Woyte et al (2003), em países industrializados, os sistemas conectados à rede elétrica são instalados, principalmente em edifícios. A integração destes sistemas no ambiente construído oferece um grande potencial para a redução de custos da concessionária, pois instalados próximos ao ponto de consumo aliviam as perdas por transmissão e distribuição decorrentes da geração convencional, além de auxiliarem na redução da curva de carga (JARDIM et al, 2003).

Frankl e Maisini (2002) relatam que em alguns países da Europa, os resultados de uma cultura ecologista começaram a ser observados quando um conjunto de consumidores, engenheiros e arquitetos começaram a se unir para promover a difusão do sistema utilizando e

integrando os painéis solares fotovoltaicos na substituição ou sobreposição de elementos convencionais de revestimento, assim como telhas, vidros e outros.

2.9 VIABILIDADE ECONÔMICA

O custo da energia fotovoltaica ainda é muito elevado, não sendo competitivo com a geração convencional, devido ao custo do capital individual, que inicialmente é muito alto. Entretanto, existem casos onde o sistema fotovoltaico integrado à edificação e interligado à rede elétrica pública, não só pode tornar-se competitivo, como pode representar uma alternativa mais econômica.

Atualmente, o custo da energia fotovoltaica é mais cara do que a energia convencional, suprida pela companhia elétrica. Embora processos de fabricação tenham sido aperfeiçoados para a redução do custo do painel fotovoltaico desde meados de 1970. Estes custos vêm declinando desde o lançamento do primeiro programa de implantação de sistemas desse tipo no início dos anos 90 pelo governo alemão 1000- Roofs Program (RÜTHER, 2004).

Módulos solares fotovoltaicos baseados na tecnologia tradicional do silício cristalino (tanto na forma monocristalina m-Si, como na forma policristalina p-Si, doravante denominados genericamente por c-Si), sofreram uma redução de custos apreciável desde suas primeiras aplicações no fornecimento de energia elétrica para satélites (RÜTHER, 2004).

Athanasia (2000), comenta que está prevista uma redução de 25% no custo dos módulos PV para os próximos anos e Parente et al. (2002) mostram que a curva de aprendizado da tecnologia FV é da ordem de 22%, ou seja, cada vez que a produção acumulada de módulos FV dobra, os custos caem 22%. A eficiência dos módulos está crescendo e módulos com eficiências de 20 a 23% são esperados para estarem disponíveis nos próximos anos.

Conforme citam Lin (2000) e Green (2003), a produção anual fotovoltaica vem crescendo cerca de 40% ao ano nos últimos anos, devido às inúmeras possibilidades de aplicação. Segundo PV News (1997), a produção total mundial era de 88.6 MW em 1996. Calcula-se que com o declínio dos preços e os novos mercados, este índice de crescimento na produção passará para 20 a 30% nas próximas décadas. Com essa produção em grande escala, os sistemas integrados poderão cair para \$1/Wp (LIN, 2000), uma projeção considerada demasiadamente otimista por muitos analistas. Em 2003, esta produção chegou a 672 MW (PV NEWS, 2004).

O Departamento de Energia dos Estados Unidos, conforme relata o US-DOE (1997), vêm identificando os campos de aplicação dos sistemas fotovoltaicos, onde, mesmo ao custo atual, são economicamente viáveis.

Poponi (2003) comenta que o sistema integrado à edificação e conectado à rede elétrica nos Estados Unidos tem provado ser economicamente competitivo no mercado de pico de carga de demanda. Isto ocorre particularmente no caso de sistemas instalados em prédios comerciais e em áreas específicas, que tenha uma combinação favorável de preços de energia e taxas de créditos.

A viabilidade econômica se deve também, ao fato de que o sistema integrado à edificação, ao mesmo tempo em que gera energia, pode substituir elementos construtivos convencionais da edificação, como telhas, janelas, materiais de fachada, bem como elementos de sombreamento, possibilitando assim, uma maior economia ao proprietário.

Outro aspecto importante é o fato de que instalações solares fotovoltaicas integradas a prédios e escritórios, interligados à rede elétrica pública, são alguns exemplos de aplicação ideais, onde os picos de consumo e de geração são muitas vezes coincidentes. Isso se deve ao fato de que, principalmente em períodos de calor intenso, a demanda energética nestas

edificações aumenta de forma acentuada, em consequência, principalmente, da utilização de aparelhos de ar-condicionado.

De acordo com Byrne et al. (1996), o primeiro nicho de mercado para a tecnologia fotovoltaica irá ser provavelmente o de “economia de pico”, ou seja, a possibilidade de redução do pico de demanda, utilizando sistemas despacháveis em edifícios comerciais, localizados em regiões com alto varejo de preços a boa incidência solar.

Segundo Rüther (2004), de acordo com o princípio de sincronicidade, em que a geração e consumo ocorrem simultaneamente, a energia elétrica gerada em alguns períodos do dia tem um valor maior para a concessionária do que em outros períodos onde a demanda não é crítica. Desta forma, o sistema fotovoltaico integrado à edificação e interligado na rede elétrica pública pode aliviar o sistema de T & D (transmissão e distribuição) da concessionária elétrica, diminuindo custos na geração de energia e sobrecarga da rede nos horários de pico, para alimentadores com pico diurno.

O sistema integrado, hoje em dia, faz parte do conceito de energia eficiente em residências do Japão, Alemanha e parte dos Estados Unidos. Futuramente, ele poderá ser visto em diversos edifícios públicos e industriais.

Sick et al. (1996), comentam que um grupo de 90 pesquisadores norte americanos, formou o Utility Photovoltaics Group para promover e patrocinar a instalação de sistemas PV distribuídos ao redor do mundo.

Lin (2000) cita que a indústria fotovoltaica está posicionada para tornar-se uma das maiores no próximo século. Pelo ano de 2025, mais de 3,6% da eletricidade mundial poderá ser gerada pela tecnologia fotovoltaica. A energia renovável, incluindo a fotovoltaica, poderá tornar-se a maior fonte de energia até 2050. Para geração de energia, 2040 será o período crítico com maior índice de energia renovável do século 21, segundo Lin (2000).

Segundo a ELETROBRÁS/PROCEL (2001), devido ao acordo firmado entre diversos países, com o objetivo de promover o uso racional de energia com a utilização de fontes alternativas de energia, centenas de milhões de dólares estão sendo gastos em programas de pesquisa e desenvolvimento. Embora as fontes renováveis ofereçam benefícios ambientais comparados a combustíveis fósseis, o custo de geração ainda permanece alto. Estes custos têm diminuído, e é provável que diminuam ainda mais; porém, a implementação destas fontes poderia ser mais acelerada se os governos investissem mais em programas de pesquisa e desenvolvimento. Assim, gerações futuras poderiam obter benefícios através da utilização de uma energia limpa e sustentável, de forma a contribuir com a preservação do meio ambiente.

A produção de energia fotovoltaica irá beneficiar a sociedade global, criando empregos, distribuindo o suprimento de energia, prevenindo a poluição e principalmente, a degradação do meio ambiente.

2.10 PROGRAMAS DE INCENTIVO

Para aumentar o grau de competitividade entre as energias renováveis, alguns países procuram incentivar estas tecnologias, proporcionando uma maior participação destas na matriz energética, reestruturando e privatizando seus setores energéticos, encaminhando-os para uma situação de livre mercado, no qual o estado atua como agente regulador.

No Brasil, a viabilidade está relacionada a incentivos tanto do governo quanto de empresas privadas, que como nos países desenvolvidos, financiam e promovem os projetos, com a finalidade de obter um maior desenvolvimento do país.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – na área de normalização, através da Comissão de Estudos CE-82.1 (Sistemas de Conversão Fotovoltaica de Energia Solar) do Comitê Brasileiro de Eletricidade – COBEI vem se empenhando no sentido de elaborar normas técnicas referentes aos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

Como exemplo de utilização no Brasil, Rütther e Dacoregio (2000) descrevem a primeira instalação solar fotovoltaica integrada à edificação e interligada à rede pública, que foi posta em operação em setembro de 1997, no campus da Universidade Federal de Santa Catarina em Florianópolis, juntamente com o Laboratório de Energia Solar (LABSOLAR) e com o Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEEE). O sistema tem como objetivo, suprir a demanda energética de uma família com quatro pessoas em uma residência urbana típica brasileira.

Baseados neste cenário, vários países já estabeleceram mecanismos de incentivo para a difusão do uso da tecnologia fotovoltaica como fonte descentralizada de geração de energia.

Como exemplo de países que estão investindo em pequenos sistemas fotovoltaicos conectados à rede, podemos mencionar a Alemanha, Áustria, Austrália, Estados Unidos, Espanha, Grécia, Holanda, Itália, Japão e Suíça. Dentro destes países, merecem destaque as experiências espanhola, japonesa e alemã, pois possuem incentivos às fontes renováveis, sob a forma de leis que obrigam as concessionárias a comprar a eletricidade gerada por fontes renováveis não convencionais e de pequeno porte.

- A Alemanha, segundo Martin (1998), até um tempo atrás, era, sem dúvida, o país onde as edificações fotovoltaicas conectadas à rede elétrica (EFCR) tinham um maior crescimento, tendo sua capacidade total instalada multiplicada por 20 nos últimos sete anos.

Hoje em dia, conforme relata Kurokawa (2001), a Alemanha perdeu o título de número um em instalações fotovoltaicas conectadas à rede para o Japão, mas ainda é o país que possui o maior número de mecanismos de incentivos, cuja evolução foi a seguinte:

- Primeiro período, anterior a 1990: A totalidade das EFCR era projetos de demonstração, financiados pela União Européia, Ministério da Educação, Ciência, Investigação e Tecnologia, e algumas companhias elétricas.

- Segundo período, 1990-1995: O governo federal e estadual alemão financiou um projeto denominado “*1.000 telhados fotovoltaicos*” e ofereceu uma subvenção de 70% do investimento inicial na instalação do sistema. Este programa subsidiou a instalação de 2500 sistemas conectados à rede de distribuição. O sistema estimulou um pequeno crescimento no mercado privado, com preços na faixa de 8-10 \$/ Wp (MAYCOCK, D. P, 1997).

- Terceiro período, 1995-1997: Esta última etapa se caracteriza pela aparição de numerosos modelos para a introdução no mercado das EFCR.

Desde então, os sistemas conectados à rede alemã vêm recebendo atenção cada vez maior. Prova disso são os desdobramentos conseguidos nos programas de incentivos à tecnologia solar adotados nos anos seguintes.

Conforme citam Erge et al (2001), o “*100.000 Roofs Solar Programme*” e o “*PV Programmes at Schools*”, financiados por concessionárias e governos; “*SONNE online*”, financiado por PreussenElkra; “*Sonne in der Schule*”, financiado por BMWi .

Segundo o Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (2000), em abril de 2000 foi publicada uma lei alemã para as tecnologias renováveis – Act on Granting priority to Renewables Energy Sources (2001), que aumentou significativamente a remuneração oferecida à eletricidade fornecida pelos sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

Pesquisadores do Greenpeace (1997), comentam sobre os programas de incentivo em alguns países, dentre eles estão:

- A Áustria: em 1992 deu início ao programa “*200 kWp de telhados fotovoltaicos*”, dando subsídio de 7000 US\$/kWp para a instalação de sistemas conectados à rede. Algumas autoridades locais ofereceram ainda uma subvenção adicional para a instalação de sistemas fotovoltaicos em residências. Em março de 1996, foi criada a lei que obriga as companhias

elétricas a adquirir a eletricidade entregue à rede, produzida por sistemas solares, remunerando-a com valores incentivados.

- A Austrália: é um dos países que, assim como o Brasil, vêm reestruturando seu setor energético. Conforme informações do Greenpeace (1997), a utilização da geração distribuída com sistemas fotovoltaicos vem sendo experimentada através de diversos projetos piloto, financiados pelas empresas distribuidoras locais e governo. É o caso da Vila Olímpica, construída para receber os Jogos Olímpicos de Sidney em 2000. Cada casa onde foram alojados os atletas é capaz de produzir eletricidade suficiente para satisfazer o consumo no período diurno, podendo entregar eventuais excessos à rede de distribuição.

- Os Estados Unidos: existem diretrizes nacionais que incentivam estados e empresas a financiarem instalações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. A Califórnia é um dos estados americanos que mais incentivou o uso de tecnologias renováveis, dentre elas a energia solar. Os incentivos são incluídos em um fundo de apoio à geração elétrica, utilizando energias renováveis (Renewable Resources Trust Fund), de US\$ 540 milhões.

- A Grécia: uma lei estadual em vigor desde 1996 estabelece que 75% dos custos de investimentos em equipamentos e sistemas de geração de energia a partir de fontes renováveis podem ser dedutíveis dos impostos dos compradores.

- A Suíça: o programa "*Energy 2.000*" tem como objetivo multiplicar por 25 a sua capacidade instalada em sistemas fotovoltaicos conectados à rede, ainda nesta década. Com isso, o Governo Federal passou a apoiar a inserção de sistemas fotovoltaicos, com uma subvenção de 3000 US\$/kWp para todas as instalações conectadas à rede, que sejam construídas em edifícios escolares.

- A Holanda: inicialmente, os investimentos em sistemas fotovoltaicos recebiam cerca de 5 US\$/kWp, de incentivo, financiados com um incremento de 2% na tarifa elétrica. No total, até final de 1990 a Holanda possuía uma potência instalada de cerca de 8MWp sendo

que até 2007 se pretende atingir uma potência acumulada de 250 MWp. Schoen (2001) cita que, a partir de 1990 começaram a aparecer programas governamentais que dão suporte a essa atividade, como o “*PV Learning programme*”, “*PV-tenderPV-Go*” e o “*PV Covenant*”.

- O Japão: em julho de 1974, foi iniciado o projeto “Sunshine” e que, posteriormente, foi reformulado no “*New sunshine program*”, de forma a incluir em seu campo de atuação energias renováveis. O Ministério da Indústria e Comércio (MITI) lançou, em 1994, o programa “*70.000 telhados*”, responsável em subvencionar a instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no setor doméstico, cobrindo 50% do custo total de sistemas com até 5kWp instalado.

- A Espanha: em 23 de dezembro de 1998, tornou público o Real Decreto 2818/1998, versando sobre a produção de energia elétrica por instalações abastecidas por recursos ou fontes de energia renováveis. Os incentivos dados às fontes, têm a finalidade de aumentar a contribuição das fontes renováveis na matriz energética espanhola, cerca de 12%.

Em função desse histórico de incentivos, os custos da energia gerada por sistemas fotovoltaicos conectados à rede estão diminuindo significativamente. No entanto, ainda são excessivamente altos comparados aos custos da geração convencional.

Benefícios energéticos colaterais incluem externalidades ambientais que normalmente não são consideradas na análise de custo. Estes benefícios energéticos podem ser multiplicados se os benefícios da geração distribuída forem levados em conta (BAZILIAN et al, 2001).

Externalidade é a ação pela qual um consumidor influencia outros produtores ou consumidores, mas não sofre as consequências disto sobre o preço de mercado. Estas externalidades podem ser positivas, quando a ação de umas das partes

beneficia a outra, ou negativas, quando a ação de umas das partes impõem custos à outra (informação verbal)¹.

A externalidade existe quando o bem-estar do sujeito é afetado, não só pelas suas atividades como também pelas atividades de outros.

2.11 CONCLUSÃO

A presente revisão bibliográfica pôde identificar os benefícios da utilização dos sistemas solares fotovoltaicos no mercado energético mundial e apresentar a sua contribuição para a conservação do meio ambiente.

Com os estudos realizados, foi possível verificar que o sistema energético mundial está passando por crises, devido, principalmente, à aceleração global do consumo energético, decorrente do aumento populacional e da baixa eficiência energética. O sistema fotovoltaico, além de solucionar alguns destes problemas, por ser instalado próximo ao ponto de consumo e apresentar uma excelente capacidade de trabalho com outras fontes geradoras, além de poder substituir ou se sobrepor a elementos de revestimentos da edificação, de forma minimizar o seu custo final.

Dentro da revisão bibliografia analisada, não foi encontrado nenhum estudo aproximado do potencial de geração fotovoltaica em áreas urbanas.

¹ Nota fornecida por SICA, E. T. na disciplina de Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD). Florianópolis, 2002.

METODOLOGIA

3.1 Introdução.....	43
3.2 Objeto de Estudo.....	43
3.2.1 Setores da Cidade de Florianópolis.....	44
3.2.2 Setores da Cidade de Belo Horizonte.....	45
3.3 Coleta de Dados.....	47
3.3.1 Pesquisa Documental.....	47
3.3.2 O Universo Traçado na Busca de Informações.....	47
3.4 Caracterização da Coleta de Dados.....	50
3.5 Quantificação das Áreas de Cobertura.....	50
3.5.1 Amostragem para a Cidade de Florianópolis.....	51
3.6 Cálculo para Percentual de Sombreamento.....	52
3.7 Inclinação e Orientação.....	54
3.8 Cálculo de Radiação e Geração Solar Fotovoltaica.....	57

3.1 INTRODUÇÃO

A presente pesquisa tem por finalidade verificar o potencial de geração de energia solar fotovoltaica em áreas urbanas de duas capitais do Brasil, Florianópolis - SC e Belo Horizonte - MG. Foram considerados para estudo dois setores da cidade de Florianópolis, um residencial e outro comercial; para a cidade de Belo Horizonte foram considerados três setores, um comercial, um residencial e o outro misto. A análise considera que toda a área útil¹ das coberturas das edificações dos setores estudados seja coberta por módulos fotovoltaicos.

O estudo faz uma análise dos diferentes modelos e tecnologias de módulos FV comercialmente disponíveis, que melhor se integram às edificações e às condições climáticas das regiões, verificando prós e contras de cada modelo. A escolha da tecnologia foi feita de forma a suprir as necessidades do consumidor quanto à energia gerada, integração à edificação, área de cobertura disponível e eficiências em diferentes condições climáticas.

3.2 OBJETO DE ESTUDO

Para a realização da pesquisa, foram selecionadas duas cidades brasileiras: Florianópolis- SC e Belo Horizonte- MG.

As duas cidades apresentam diferentes características, tais como: construtivas, de consumo energético, de níveis de radiação solar em função da latitude local e do clima. Para cada uma das duas cidades foram selecionadas áreas urbanas, que foram denominadas de setores.

¹ Considera-se área útil toda a área de cobertura disponível para a implementação de um sistema FV, considerando a orientação e sombreamento das mesmas.

3.2.1 SETORES DA CIDADE DE FLORIANÓPOLIS

Para objeto de estudo foram selecionados dois setores da cidade de Florianópolis: um situado na praia de Jurerê, com característica residencial, basicamente formado por edificações horizontais e com grande área de cobertura disponível; e outro situado em uma área central da cidade, com característica comercial, formado basicamente por edificações verticais e com uma restrita área de cobertura disponível.

As figuras 5 e 6 mostram os mapas de localização dos setores Jurerê e Centro na cidade de Florianópolis. Os setores correspondem a áreas afastadas entre si. Uma está localizada na região norte de Florianópolis (Jurerê) e a outra está localizada na região oeste (Centro).



Figura 5: Mapa de localização do setor Jurerê na cidade de Florianópolis.

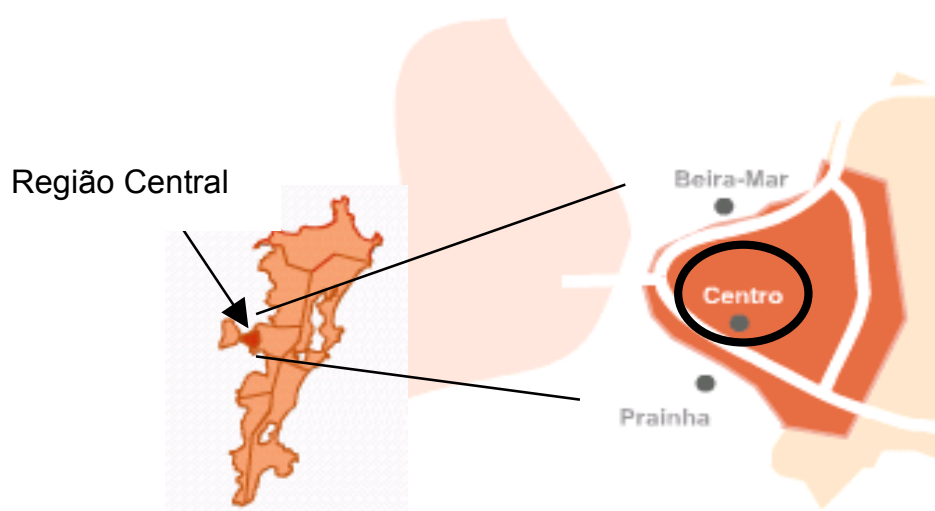


Figura 6: Mapa de localização do setor Centro na cidade de Florianópolis.

Foram observadas fotos aéreas e o plano diretor da cidade de Florianópolis correspondente a cada setor estudado, a fim de verificar a densidade dos setores, taxas de ocupação dos lotes e delimitação de áreas verdes,

Através de dados fornecidos pela concessionária local, foi verificado que cada setor é suprido de energia elétrica por único alimentador da rede de distribuição da concessionária local CELESC (Centrais Elétricas de Santa Catarina).

3.2.2 SETORES DA CIDADE DE BELO HORIZONTE

Na cidade de Belo Horizonte, foram analisados três setores: um denominado Hiper Centro, formado basicamente por edificações com função comercial e com características construtivas bastante verticais e densas; outro denominado Floresta, com função basicamente residencial e com características construtivas bastante horizontais e o último, denominado Santa Efigênia, formado por edificações com funções mistas e com características construtivas variadas. A figura 7 mostra o mapa de localização dos setores estudados e suas proximidades. Pode-se constatar que as áreas estudadas são bairros vizinhos.

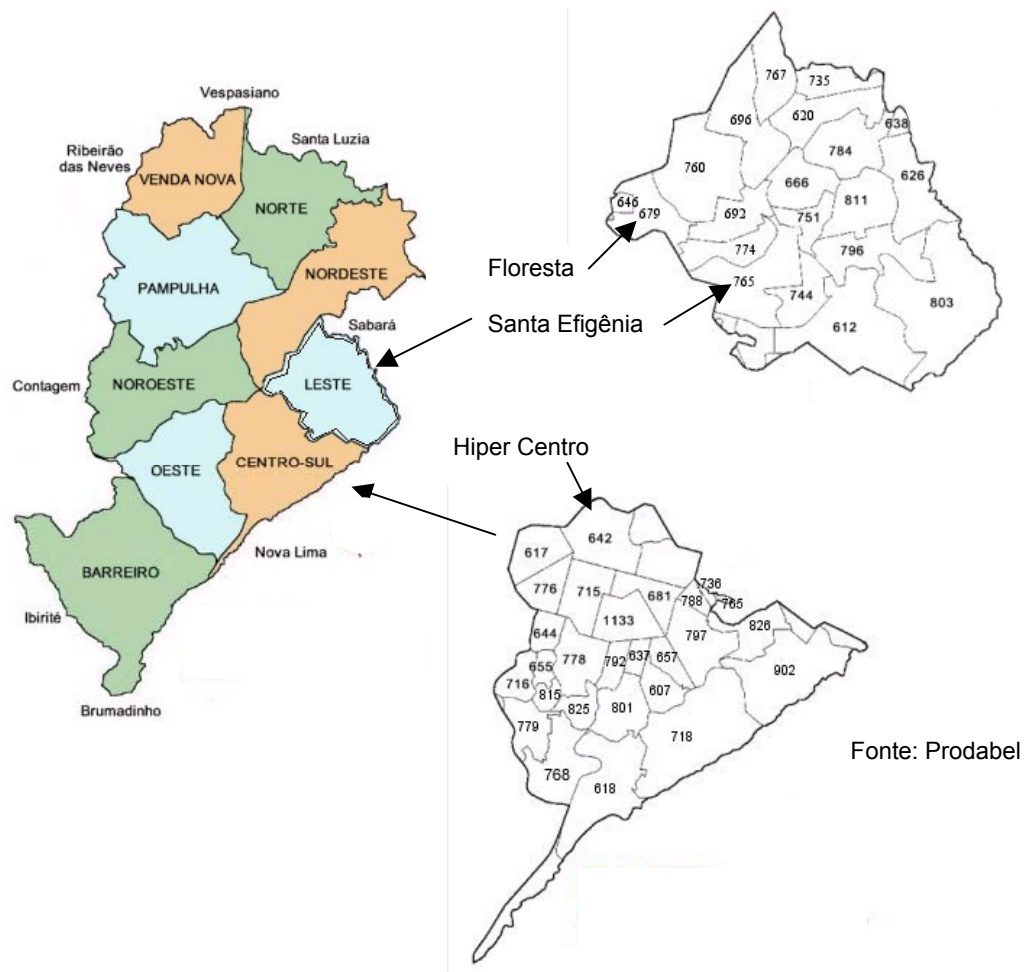


Figura 7 : Mapa de localização dos setores Hiper Centro, Floresta e Santa Efigênia da cidade de Belo Horizonte.

Através das fotos aéreas foi possível analisar a densidade habitacional de cada setor estudado da cidade de Belo Horizonte, bem como a delimitação de áreas verdes que representam neste trabalho áreas de sombreamento.

Com base nos dados fornecidos pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), foi verificado que a cada setor recebe energia elétrica de mais de um alimentador, através da rede de distribuição da concessionária local.

3.3 COLETA DE DADOS

A coleta de dados, referentes a dados construtivos, de consumo energético e de radiação solar, para a realização da pesquisa foi dividida em duas etapas: primeiramente foi feita uma pesquisa documental para a aquisição de dados e materiais necessários para a realização do estudo; posteriormente foram selecionados os objetos de estudo, ou seja, local e área a ser desenvolvido o trabalho.

3.3.1 PESQUISA DOCUMENTAL

A pesquisa documental foi realizada em órgãos públicos, buscando informações teóricas, documentos e plantas referentes às necessidades da pesquisa.

Informações atuais sobre o consumo de energia elétrica nas cidades de Florianópolis e de Belo Horizonte foram obtidas através de consultas à concessionária local, CELESC (Florianópolis) e CEMIG (Belo Horizonte), respectivamente.

As plantas de locação, distribuição dos alimentadores de energia elétrica e fotos aéreas foram utilizadas para escolher a melhor área e, conseqüentemente, melhor alimentador a ser estudado. Através deste material, foi possível calcular as áreas de cobertura disponíveis em cada setor e verificar as orientações das edificações.

Os planos diretores das cidades foram observados, para que se pudesse fazer uma comparação entre características construtivas existentes e o rendimento do sistema solar fotovoltaico nas edificações.

3.3.2 O UNIVERSO TRAÇADO NA BUSCA DE INFORMAÇÕES

Cidade de Florianópolis

1) CELESC (Centrais Elétricas de Santa Catarina)

- Informações sobre a localização da distribuição dos alimentadores de energia elétrica na cidade de Florianópolis;

- Informações sobre consumo horário, mensal e anual de cada alimentador da cidade de Florianópolis.

2) IPUF (Instituto de Planejamento Urbano da Cidade de Florianópolis)

- Obtenção das plantas de locação, implantação e fotos aéreas da cidade de Florianópolis;

- Informações sobre o uso do plano diretor em cada região da cidade de Florianópolis;

Cidade de Belo Horizonte

1) CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais)

- Informações sobre a localização da distribuição dos alimentadores de energia elétrica na cidade de Belo Horizonte;

- Informações sobre o consumo horário, mensal e anual de cada alimentador da cidade de Belo Horizonte;

2) UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais)

- Obtenção de plantas de cobertura do setor Floresta, da cidade de Belo Horizonte;

- Obtenção de área de cobertura disponível, percentual de orientações e inclinações das coberturas dos setores analisados da cidade de Belo Horizonte.

3) PRODABEL (Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte)

- Obtenção do mapa da cidade de Belo Horizonte e dos setores estudados;

- Obtenção da área de cobertura dos setores Hiper Centro e Santa Efigênia, na cidade de Belo Horizonte;

- Obtenção de fotos aéreas da cidade de Belo Horizonte.

Para ambas as cidades

1) LABSOLAR (Laboratório de Energia Solar)

- Obtenção de dados de radiação solar para as cidades de Florianópolis e Belo Horizonte.

Os dados de radiação solar para a cidade de Florianópolis foram dados obtidos através da estação solarimétrica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e os dados de radiação solar para Belo Horizonte foram obtidos através de imagens de satélite.

2) PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Como referenciais teóricos para a pesquisa, foram buscados dados e informações em:

- Periódicos indexados, nacionais e internacionais, pesquisados em bibliotecas virtuais e bibliotecas de universidades;
- Livros e teses relevantes;

3) SOFTWARES UTILIZADOS

- *Radiasol*: Programa de simulação das médias diárias mensais e anuais de radiação solar no plano do módulo, desenvolvido pelo laboratório de energia solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O ponto de partida para os cálculos é a informação da radiação solar global diária sobre superfície horizontal, acompanhada da correspondente latitude e data (dia e mês).

- *Lightscape*: Programa de visualização, que a partir de um modelo tridimensional delimita a área sombreada por um elemento em horários e épocas do ano. (<http://www.lightscape.com>)

3.4 CARACTERIZAÇÃO DA COLETA DE DADOS

Para esta etapa foram necessários:

- Dados de radiação solar, médias diárias mensais e anuais para a cidade de Florianópolis e Belo Horizonte;

- Delimitação da área abrangente dos alimentadores adotados;

- Levantamento da área total de cobertura, correspondente a cada setor;

- Percentual de cobertura útil para a implantação do sistema fotovoltaico;

- Percentual de orientação e inclinação das coberturas, para condições favoráveis ao máximo aproveitamento da energia a ser gerada;

- Percentual de sombreamento nas coberturas;

- Estudo do potencial de geração solar, através da utilização dos diferentes módulos e tecnologias FV comercialmente disponíveis.

3.5 QUANTIFICAÇÃO DAS ÁREAS DE COBERTURA

Para cada região estudada foi necessário que se calculasse a área total de cobertura dos setores, a fim de verificar a potência FV hipotética instalada.

A cidade de Florianópolis, por não possuir os valores referentes à área de cobertura total, por bairros, quantificados em um banco de dados, necessitou de um estudo mais elaborado. O cálculo foi realizado a partir de medições manuais em plantas de quadras, fornecidas pelo IPUF, dos respectivos setores da cidade. Estas plantas são referentes à área edificada e não à área de cobertura das edificações, havendo assim, um grau de imprecisão, tanto pelo fato de não corresponderem à área real de cobertura, quanto pelo fato de terem sido medidas manualmente. Estas áreas foram consideradas pelo estudo como área estimada de cobertura.

Com o objetivo de quantificar a área real das edificações dos dois setores da cidade de Florianópolis e verificar o grau de imprecisão, obtido através do cálculo da área estimada de cobertura, foram realizados estudos estatísticos a partir de uma amostra.

A cidade de Belo Horizonte, por já possuir um banco de dados referentes à área de cobertura real de cada setor, dispensou a realização deste estudo, uma vez que os valores de área total fornecidos foram considerados como área real. Estes dados foram cedidos pelo órgão público responsável por este cadastramento na cidade (PRODABEL) e pela faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

3.5.1 AMOSTRAGEM PARA A CIDADE DE FLORIANÓPOLIS

Foi realizado um estudo estatístico, através de uma amostra, coletada para cada um dos dois setores observados da cidade de Florianópolis. Em cada amostra, foram analisadas dez plantas de edificações do setor Jurerê e dez plantas do setor Centro. As figuras 8 e 9 são referentes às edificações selecionadas para a amostra de cada setor estudado.

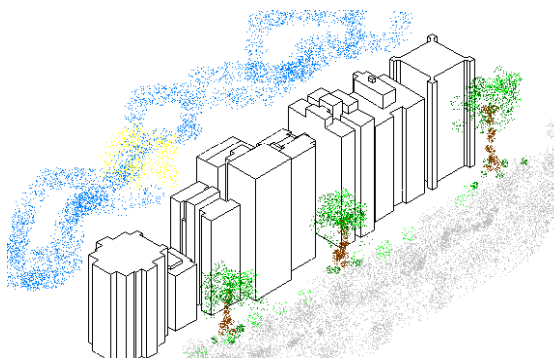
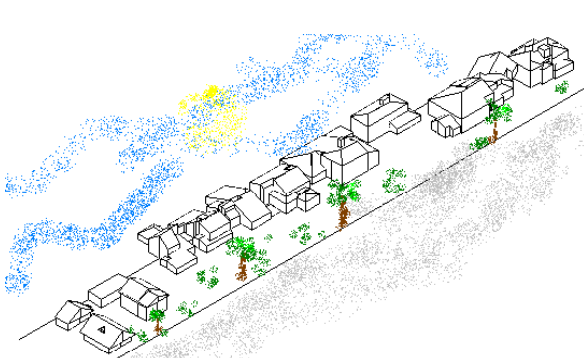


Figura 8: Edificações da amostra do setor Jurerê. **Figura 9:** Edificações da amostra do setor Centro.

Em cada planta, correspondente a uma determinada edificação selecionada, foi calculada a área total de cobertura, inclinação média, orientação e área sombreada desta. A partir disso, foram identificados os valores médios de área real, inclinação, orientação e

sombreamento por edificação dos setores correspondentes. Este estudo permitiu uma idéia do predomínio das características construtivas, referente às coberturas das edificações dos setores Jurerê e Centro.

Para quantificar o grau de imprecisão, obtido através do cálculo de área estimada de cobertura com relação à área real, as edificações coletadas para o estudo de amostra foram localizadas na planta de quadra e confrontados os valores de área estimada (calculada a partir da planta de quadra) e área real (calculada a partir da amostra). O valor obtido da relação entre a primeira e a segunda, foi considerado o fator de correção desta imprecisão. Portanto, a área real do setor foi obtida pela divisão da área estimada pelo fator de correção encontrado.

Como existe uma variação significativa entre os valores de área real e área estimada, foi adotado para o estudo o menor valor entre eles, a fim de se obter um resultado mais conservativo.

3.6 CÁLCULO DO PERCENTUAL DE SOMBREAMENTO

Para calcular a média anual de sombreamento nas edificações da cidade de Florianópolis foi utilizado o programa *lightscape*. A partir das amostras, foram criadas maquetes eletrônicas das coberturas das edificações, considerando a área real de cobertura destas e simuladas as projeções de sombra. Assim, foi verificado o caminho percorrido pela sombra nas datas correspondentes aos três períodos marcados pela declinação solar durante o ano, que são os solstícios e os equinócios (meses de junho, setembro e dezembro). Em cada mês foi escolhido o pior dia e o estudo foi realizado considerando três horários: 9h, 12h e 15h. Foram escolhidos horários no início da manhã, ao meio dia (horário de maior incidência solar) e na metade da tarde. Uma vez simuladas as projeções para cada período, foi calculada uma

média anual (m^2) de sombra nas coberturas de cada setor da cidade de Florianópolis. Isto foi realizado a partir das médias dos três horários adotados e dos três períodos.

As figuras 10 e 11 correspondem às imagens, em planta baixa, das edificações selecionadas para o setor Jurerê e para o setor Centro. As edificações foram agrupadas uma ao lado da outra, respeitando o recuo estabelecido pelo plano diretor da cidade. Nestas imagens foram identificadas as áreas sombreadas, tanto pelas edificações vizinhas quanto por elementos da própria edificação, para o período de solstício de verão, no horário correspondente às 9 horas.



Figura 10 : Imagem do Programa *Lightscape* para o Solstício de Verão, às 9 horas, no setor Jurerê.

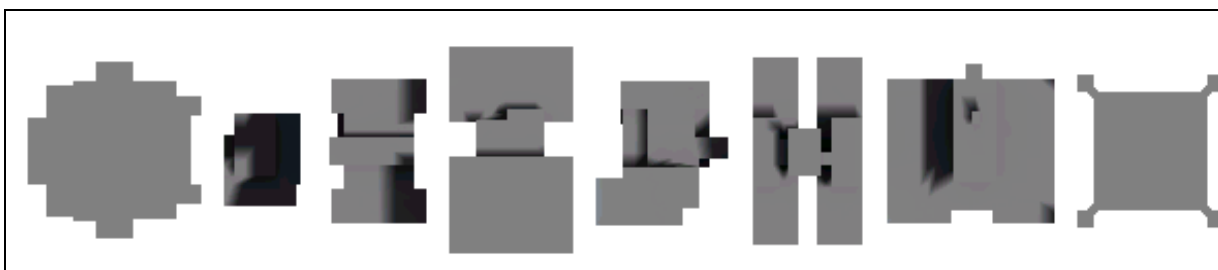


Figura 11: Imagem do Programa *Lightscape* para o Solstício de Verão, às 9 horas, no setor Centro.

Como o valor de área sombreada foi obtido de forma total anual por edificação, foi necessário que se identificasse a quantidade de área sombreada para cada orientação, uma vez que estas recebem quantidades de radiação solar diferentes e estas quantidades estão relacionadas com a área.

Para obter a média anual de área sombreada (real ou estimada) para cada orientação, foi verificada uma relação entre área total de sombra (real ou estimada) e área da edificação

(real ou estimada). Este valor foi multiplicado pela média de área (real ou estimada) de cada orientação.

Com base nestes valores, foram obtidas as áreas úteis (reais ou estimadas) para a implementação do sistema FV, ou seja, as áreas correspondentes a cada orientação, subtraídas da área de sombreamento correspondente.

O estudo de sombreamento, assim como a análise estatística, somente foi realizado para a cidade de Florianópolis, uma vez que não se dispunha de informações suficientes para a realização deste na cidade de Belo Horizonte. Portanto, foi adotado para a cidade de Belo Horizonte o mesmo valor da relação obtido entre o percentual de suprimento do consumo para o caso real, apresentado no item 3.7, dos setores da cidade de Florianópolis. Foi adotado o maior valor percentual obtido entre os setores Jurerê e Centro, com o objetivo de atingir um resultado mais conservativo

3.7 INCLINAÇÃO E ORIENTAÇÃO

Uma vez quantificadas as áreas das coberturas dos setores escolhidos, foi efetuado o cálculo de geração de energia FV possível de ser produzida por um sistema FV hipotético que ocupasse toda a área equivalente. Foram realizados três estudos de caso para a cidade de Florianópolis e para a cidade de Belo Horizonte. O primeiro estudo de caso, considera para cálculo de geração FV os módulos na horizontal e desconsidera as questões de sombreamento e inclinação das coberturas, o segundo estudo de caso considera os módulos com inclinação igual à latitude local e orientados para o norte geográfico, também desconsiderando as questões de sombreamento e o terceiro estudo de caso considera as questões reais das edificações dos setores. Este último estudo é baseado numa análise a partir de uma amostra,

onde são verificadas as médias reais de área de cobertura, inclinação, orientação e sombreamento das edificações dos setores correspondentes.

Através dos dados de radiação global horizontal, fornecidos pelo LABSOLAR, foi possível quantificar a radiação solar incidente na cidade de Florianópolis e na cidade de Belo Horizonte, desconsiderando a inclinação das coberturas. Para isto, foram utilizados diretamente os dados horários de radiação global horizontal, pois primeiramente o estudo de geração de energia foi realizado considerando o ângulo de inclinação dos painéis de zero grau e, conseqüentemente, desvio azimutal também zero. Considera-se desvio azimutal a variação de orientação com relação ao norte.

Este primeiro estudo teve como objetivo a obtenção de uma idéia global do potencial de geração fotovoltaica de cada setor nas duas cidades.

Depois de obtido o valor de geração fotovoltaica para inclinação de zero grau, foi realizado o segundo estudo de caso: coberturas com inclinações e orientações ideais, ou seja, inclinadas de acordo com a latitude local (27^0 Florianópolis e 20^0 Belo Horizonte) e voltadas para norte verdadeiro, portanto, com desvio azimutal zero. Para este estudo, tanto como para o terceiro estudo de caso, foram utilizados dados de radiação solar, baseados no plano inclinado do painel. Para a obtenção destes valores, foi utilizado o programa *radiasol*.

O terceiro caso, foi realizado através de uma amostra, coletada para cada um dos setores da cidade de Florianópolis. Neste, foram considerados para cálculo de geração de energia FV o valor médio (estimado ou real) de área útil de cobertura, o valor médio ponderado da inclinação das coberturas e o valor médio (real ou estimado) das áreas com as orientações correspondentes. Estes valores foram calculados através das amostras, descritas no item 3.5.1.

Obtidos os valores de média estimada útil de área de cobertura (estimada ou real), considerando como inclinação destas o valor correspondente à média ponderada das inclinações das amostras e considerando as questões de sombreamento e as orientações das coberturas descritas no item 3.6, foi calculada a quantidade média de energia FV gerada para cada um dos setores da cidade de Florianópolis. Como cada orientação corresponde a um nível de radiação solar diferente e a quantidade desta está relacionada com a área, foi calculada a percentagem da média de área (real ou estimada) correspondente a cada orientação. Desta forma, cada orientação teve uma quantidade de radiação solar equivalente ao seu percentual de área. Estes valores foram somados, a fim de se obter a quantidade de radiação solar total, considerando as orientações úteis das edificações.

Neste terceiro estudo de caso, foi calculada a média de geração FV por edificação do setor, ou seja, foi considerada uma edificação com o valor médio (real ou estimado) de área total de cobertura, valor médio (real ou estimado) área de cobertura sombreada, valor médio (real ou estimado) de área para cada orientação, valor médio ponderado de inclinação das coberturas e valor médio de consumo energético do setor por edificação.

Com base nestes valores, foi calculada a potência instalada necessária para suprir todo o consumo médio por edificação e posteriormente a área requerida para a instalação desta potência, considerando as tecnologias FV estudadas. A metodologia para estes cálculos está descrita no item a seguir, referente a cálculo de radiação e energia fotovoltaica, item 3.8.

O estudo de geração FV para o terceiro estudo de caso, que considera a média por edificação do setor, apresenta os mesmos valores de resultados obtidos para todo o setor. As variáveis neste caso são a área útil e a área requerida para a instalação da potência necessária, pois os valores percentuais de suprimento do consumo são os mesmos para ambos os casos.

Como mencionado no item 3.6, o estudo da amostra para a cidade de Belo Horizonte não foi realizado, portanto o terceiro estudo de caso para esta região considerou o maior valor de relação obtido entre o percentual de suprimento do consumo para o caso real e para o caso ideal, dos setores da cidade de Florianópolis. Este valor, foi multiplicado pelo percentual de suprimento do consumo nos setores de Belo Horizonte, a fim de quantificar, aproximadamente, o percentual de suprimento dos setores considerando o caso real das edificações.

Pelo fato de que o custo de um sistema de geração FV ainda é considerado elevado, foi assumido que, para a implementação de um sistema FV a um nível vantajoso, só seriam admitidas orientações que poderiam gerar no mínimo 90% da energia FV a ser gerada pela orientação ideal, ou seja, áreas voltadas para o norte verdadeiro e com inclinações igual à latitude local. Desta forma, foi possível identificar quanto da área real existente pode ser aproveitada para a implementação de um sistema FV a um nível vantajoso.

3.8 CÁLCULO DE RADIAÇÃO E GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

Para calcular a quantidade de radiação incidente em uma superfície inclinada, foi utilizado o programa *radiasol*, desenvolvido pela Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS, 2002). Os valores de radiação obtidos através do programa, são valores médios mensais em kWh/m²/dia, calculados a partir do banco de dados de radiação solar disponibilizado pelo LABSOLAR.

A potência instalada no sistema foi obtida em função do consumo energético do setor, da radiação incidente no plano do painel e da eficiência do sistema inversor. (Eq.1)

$$P_{CC} = E / G_{POA} / N_{EL} \quad (1)$$

P_{CC} corresponde à potência instalada (kW), E corresponde à quantidade de energia fotovoltaica gerada pelo sistema (kWh/ano), G_{POA} (kWh/m²/ano) corresponde à radiação incidente no plano do módulo e N_{EL} corresponde à eficiência do sistema inversor, com valor tipicamente 90%.

A área requerida para a instalação de um sistema FV foi obtida em função da potência instalada e da eficiência do módulo. (Eq.2)

$$A_{REQUERIDA} = P_{CC} / E_{FF} \quad (2)$$

$A_{REQUERIDA}$ corresponde à área de cobertura necessária para a implementação do sistema (m²), P_{CC} corresponde à potência instalada (kW) e E_{FF} corresponde à eficiência do módulo FV a ser instalado no sistema (%).

Para os três estudos de caso da cidade de Florianópolis e para os dois da cidade de Belo Horizonte, foram consideradas seis tecnologias de módulos FV, assumidos como representativos das principais tecnologias disponíveis no mercado. Para a cidade de Florianópolis foram realizadas, portanto, para cada setor, 18 simulações da relação área de cobertura disponível para a geração FV pelo consumo energético do setor considerado e para a cidade de Belo Horizonte foram realizadas 12 simulações, uma vez que esta não dispunha de uma amostra para a realização das simulações considerando o terceiro estudo de caso.

A tabela 1 apresenta as tecnologias dos módulos utilizadas para o cálculo de geração fotovoltaica e suas correspondentes características. Como mencionado no capítulo 2, referente à revisão bibliográfica, as tecnologias apresentam características distintas, principalmente com relação à eficiência dos módulos e comportamento com a temperatura.

Tabela 1: Características das tecnologias dos painéis fotovoltaicos utilizados para os estudos de caso, nas regiões de Florianópolis e Belo Horizonte.

Tecnologia	Fabricante	Modelo	Pot. Nominal (W)	Área do Módulo (m ²)	EFF _{STC} ² (%)
m-Si	BP Solar	BP 5170 S	170	1,26	13,50
a-Si	Bekaert ECD Solar Systems	Uni-Solar US-64	64	1,12	6,30
p-Si	BP Solar	BP 375 S	75	0,64	11,60
CdTe	First Solar	FS 50 D	50	0,72	6,90
CIS	Würth Solar	WS 11007	60	0,73	8,20
HIT	Sanyo	HIP J54BA2	180	1,18	17,30

Como a performance dos módulos de a-Si independe da temperatura de operação das células (RÜTHER et al, 2003), estes são os únicos que não possuem coeficientes de temperatura negativos. A performance do restante das tecnologias depende da temperatura de operação das células e cada modelo de módulo possui um coeficiente de temperatura de operação diferente. Por este motivo, foi necessário recalcular as eficiências destas tecnologias, em função dos seus respectivos coeficientes e da temperatura de operação estimada. Para o cálculo da eficiência, considerando a variação desta com a temperatura (EFF_{NOCT}), foi necessária a obtenção de um valor ΔE_{FF} . Foi considerada uma temperatura de operação dos módulos (NOCT³) de 45°C. Como nos padrões normais (STC) os módulos são etiquetados a uma temperatura de 25°C (KURTZ, S.A et al, 2000), obtém-se: (Eq.3)

$$\Delta E_{FF} = (NOCT - STC) \times TCO_{EFF} \quad (3)$$

TCO_{EFF} corresponde ao coeficiente de temperatura sobre a potência do módulo.

Para chegar ao valor da eficiência considerando as questões de temperatura (EFF_{NOCT}), foi utilizada a equação 4 (Eq.4).

$$EFF_{NOCT} = EFF_{STC} \{ [100 - (|TCO_{EFF}| \times \Delta T)] / 100 \} \quad (4)$$

² STC do inglês Standard Test Conditions, significa que a potência nominal dos módulos atinge o respectivo valor, quando submetido a uma radiação de 1000W/m² e a uma temperatura de 25°C. (CARR, J.A, 2004). Valores de eficiência segundo STC, obtidos através do programa *Solar Modules*, que apresenta as características dos diversos modelos e tecnologias FV.

A tabela 2 apresenta as eficiências das tecnologias utilizadas, considerando a temperatura padrão do módulo, ou seja, 25⁰C e considerando a temperatura média de operação de 45⁰C e seus respectivos coeficientes de temperatura.

Tabela 2: Valores das eficiências das tecnologias utilizadas, considerando uma temperatura padrão de 25⁰ (STC) e considerando uma temperatura média de operação de 45⁰.

Dados fornecidos pelo fabricante			NOCT (°C)	EFF _{NOCT} (%)
Tecnologia	EFF _{STC} (%)	TCO _{EFF} (%/°C)		
m-Si	13,50	-0,40 ⁴	45	12,42
a-Si	6,30	0,00 ⁴	45	6,30
p-Si	11,60	-0,40 ⁵	45	10,67
CdTe	6,90	-0,20 ⁵	45	6,62
CIS	8,20	-0,45 ⁵	45	7,46
HIT	17,30	-0,33 ⁶	45	16,16

Para o cálculo de geração de energia fotovoltaica, foram utilizados os valores de eficiência, considerando a temperatura de operação de 45⁰C, ou seja EFF_{NOCT}.

³ NOCT do inglês Nominal Operating Cell Temperature, considera a eficiência dos módulos como função da temperatura do ambiente e da velocidade do vento, assumindo uma temperatura média de operação da célula de 45⁰C (KURTZ, S.A et al, 2000).

⁴ Valor de eficiência (TCO_{EFF}) segundo Rütther et al. (2004).

⁵ Valores de eficiência (TCO_{EFF}) segundo Nann e Emmergy (1992).

⁶ Valores de eficiência (TCO_{EFF}) segundo Sanyo (2004).

RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Introdução.....	63
4.2 Setores da cidade de Florianópolis.....	64
4.2.1 Cálculo de Geração Fotovoltaica e Área Requerida.....	70
4.2.1.1 Setor Jurerê.....	70
4.2.1.1.1 Primeiro Estudo de Caso – Superfícies Planas e Horizontais.....	70
4.2.1.1.2 Segundo Estudo de Caso – Superfícies Inclínadas a 27 graus.....	73
4.2.1.1.3 Terceiro Estudo de Caso – Condições Reais.....	75
4.2.2.1 Setor Centro.....	81
4.2.2.1.1 Primeiro Estudo de Caso – Superfícies Planas e Horizontais.....	81
4.2.2.1.2 Segundo Estudo de Caso Superfícies Inclínadas a 27 graus.....	83
4.2.2.1.3 Terceiro Estudo de Caso – Condições Reais.....	84
4.2.2 Análise dos resultados para a cidade de Florianópolis.....	87
4.3 Setores da Cidade de Belo Horizonte.....	93
4.3.1 Cálculo de Geração Fotovoltaica e Área Requerida.....	100
4.3.1.1 Setor Hiper Centro.....	101
4.3.1.1.1 Primeiro Estudo de Caso – Superfícies Planas e Horizontais.....	101
4.3.1.1.2 Segundo Estudo de Caso – Superfícies Inclínadas a 20 graus.....	104
4.3.1.1.3 Terceiro Estudo de Caso – Condições Reais.....	107

Capítulo 4

4.3.1.2 Setor Floresta.....	108
4.3.1.2.1 Primeiro Estudo de Caso – Superfícies Planas e Horizontais.....	108
4.3.1.2.2 Segundo Estudo de Caso – Superfícies Inclínadas a 20 graus.....	109
4.3.1.2.3 Terceiro Estudo de Caso – Condições Reais.....	111
4.3.1.3 Setor Santa Efigênia.....	112
4.3.1.3.1 Primeiro Estudo de Caso – Superfícies Planas e Horizontais.....	112
4.3.1.3.2 Segundo Estudo de Caso – Superfícies Inclínadas a 20 graus.....	114
4.3.1.3.3 Terceiro Estudo de Caso – Condições Reais.....	115
4.3.2 Análise dos resultados para a cidade de Belo Horizonte.....	117
4.4 Conclusões.....	127

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos potenciais de geração de energia fotovoltaica obtidos para as duas cidades analisadas, Florianópolis e Belo Horizonte. Conforme mencionado na metodologia, foram estudados dois setores da cidade de Florianópolis: um central, tipicamente comercial, com pico de demanda diurno e com edificações basicamente verticais e outro setor residencial, com pico de demanda noturno, formado basicamente por edificações horizontais. Para isso, foram realizados três estudos de caso: o primeiro considerando a instalação das placas solares na posição horizontal, o segundo considerando a condição ideal (orientação norte e inclinação de 27° , latitude local) e um terceiro considerando as orientações e inclinações reais, bem como percentuais de sombreamento, obtidos através de uma amostra.

Para a cidade de Belo Horizonte foram analisados três setores, basicamente mistos. Foram realizados três estudos de caso: o primeiro considerando a instalação das placas solares na posição horizontal, o segundo considerando as condições ideais (orientação norte e inclinação de 20° , latitude local) e o terceiro considerando as questões reais das edificações, calculado a partir do estudo real da cidade de Florianópolis.

Para as duas regiões e todos os estudos de caso, foram calculados os valores mensais de geração solar que se obteria caso as respectivas áreas consideradas disponíveis fossem cobertas por módulos FV das distintas tecnologias estudadas e comparados com o consumo energético correspondente. O desempenho deste gerador hipotético, doravante denominado sistema, em cada cidade e em cada caso analisado, será discutido no decorrer deste capítulo.

4.2 SETORES DA CIDADE DE FLORIANÓPOLIS

Como anteriormente mencionado, foram selecionados dois setores da cidade, um residencial e outro comercial. No setor residencial foi estudada toda a área da praia de Jurerê e no setor central foi estudada uma amostra referente a uma área comercial da cidade.

Através da verificação das fotos obtidas através de satélite, figuras 12 e 13 correspondentes ao setor Jurerê e ao setor Centro e através de dados obtidos do plano diretor da cidade de Florianópolis, foi possível observar a densidade, a taxa de ocupação dos lotes e a arborização de cada setor estudado.



Figura 12: Vista aérea do setor Jurerê - Florianópolis.



Figura 13: Vista aérea do setor Centro- Florianópolis.

Fonte: Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis (IPUF).

Analisando as figuras verificou-se que o setor Jurerê, além de ser bastante horizontal, possui recuos nas construções, possibilitando assim, um menor sombreamento causado por edificações vizinhas. A área referente ao setor Centro é bastante vertical e estes recuos

difícilmente existem, tornando esta área altamente densa e pouco arborizada. Como no setor Centro há um predomínio de verticalidade com alturas que variam de um a quatorze pavimentos, existe uma grande porcentagem de sombreamento nas coberturas, causada pelas edificações mais altas.

Os valores referentes ao consumo energético mensal e de demanda de cada setor, foram fornecidos pela CELESC. As áreas estudadas foram selecionadas de tal forma que cada setor recebe energia elétrica de um único alimentador. A área de Jurerê é suprida pelo alimentador INE 02 e a área central pelo alimentador ICO 07.

A figura 14 apresenta os valores de consumo de energia elétrica para 12 meses do ano, de maio de 2001 até abril de 2002, no setor Jurerê.

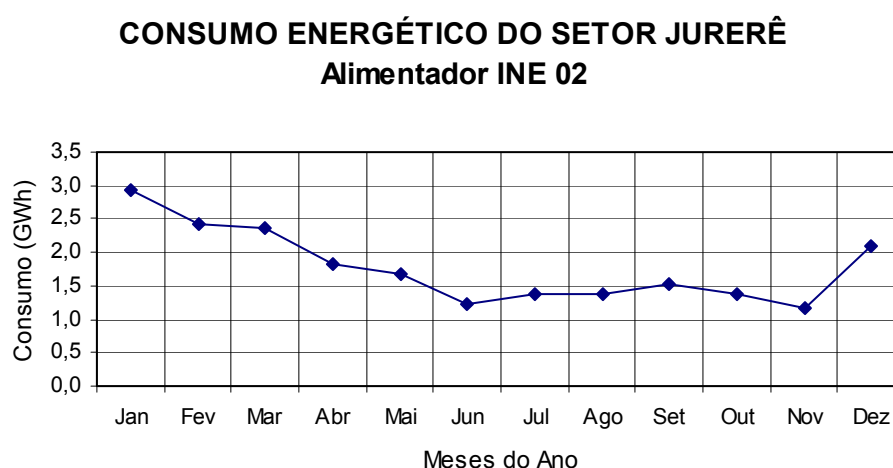


Figura 14: Dados de consumo energético para o setor Jurerê (alimentador INE 02), da cidade de Florianópolis, para os 12 meses do ano.

Observa-se que os valores diferem significativamente entre si, devido ao fato de que o setor residencial não possui muitos moradores durante o ano, fazendo com que seu consumo ocorra, na maior parte, nos meses de Dezembro a Março. Este setor atingiu um consumo anual de 21,31 GWh/ano.

A figura 15 apresenta os valores de consumo energético ao longo do ano no setor centro, para o período de maio de 2001 até abril de 2002.

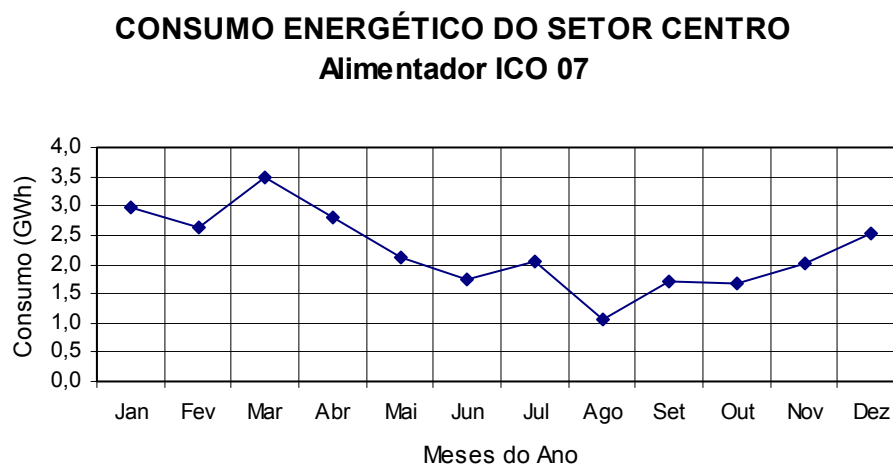


Figura 15: Dados de consumo energético para o setor Centro (alimentador ICO 07), da cidade de Florianópolis, para os 12 meses do ano.

Observa-se que no mês de março há um aumento significativo do consumo. Isto se justifica pelo fato de que neste período os trabalhadores estão retomando as atividades, pois existe um predomínio de prédios comerciais, e as temperaturas ainda são elevadas na capital catarinense, havendo um alto consumo de aparelhos condicionadores de ar. Este setor atingiu um consumo anual de 26,83 GWh/ano.

Na figura 16 é apresentado o gráfico de demanda do setor Jurerê, ou seja, alimentador INE 02, para o dia de maior pico.

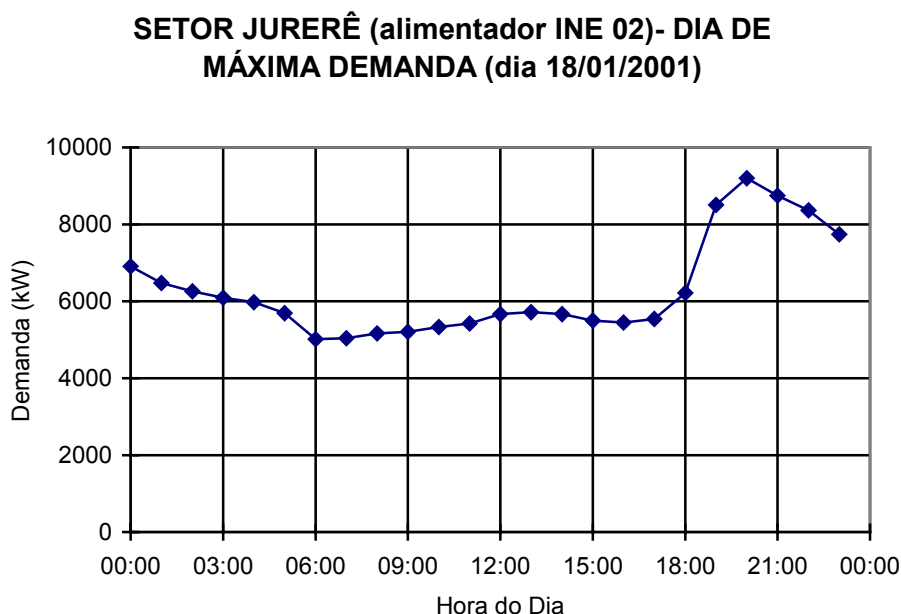


Figura 16: Curva de demanda do setor Jurerê, da cidade de Florianópolis, para dia de maior pico (dia 18/01/01).

O setor residencial possui um pico noturno, atingindo seu valor máximo por volta das 20 horas. Este horário de pico se justifica por ser um setor residencial e localizado na praia. Durante o dia, os consumidores permanecem a maior parte do tempo fora das residências, retornando à noite, provável horário de banho. Este pico atinge valor máximo durante esta atividade, devido ao fato de que o chuveiro elétrico é normalmente responsável pela maior parcela da demanda de energia elétrica de uma edificação residencial.

A figura 17 corresponde à curva de demanda do setor Centro, ou seja, do alimentador ICO 07, para o dia de maior pico.

**SETOR CENTRO (alimentador ICO 07)-DIA DE
MÁXIMA DEMANDA (dia 09/03/2002)**

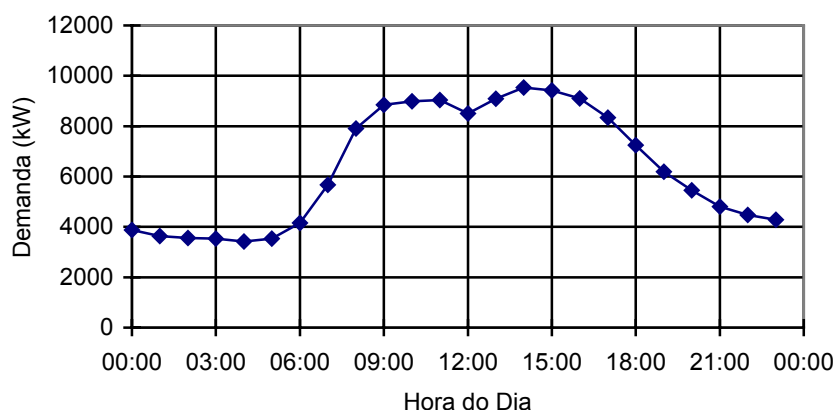


Figura 17: Curva de demanda do setor Centro da cidade de Florianópolis, para dia de maior pico de demanda (dia 09/03/02).

O alimentador ICO 07, referente à área central, possui pico de demanda diurno. A maior demanda ocorre entre as 9 horas e às 17 horas, diminuindo ao meio dia, horário correspondente ao almoço onde, possivelmente, os aparelhos de ar condicionado são desligados, atingindo seu valor máximo por volta das 14 horas, horário em que se retomam as atividades no setor comercial. Estes gráficos foram obtidos para os dias de maior demanda correspondente de cada setor.

As figuras 18 e 19 são referentes às curvas de geração solar fotovoltaica para dois períodos do ano: mês de dezembro (verão) e mês de junho (inverno), para a cidade de Florianópolis. Estes valores foram obtidos através da planta fotovoltaica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), que possui uma potência instalada de 2,08kWp.

GERAÇÃO FV DA PLANTA DA UFSC Dia 04/06/2001

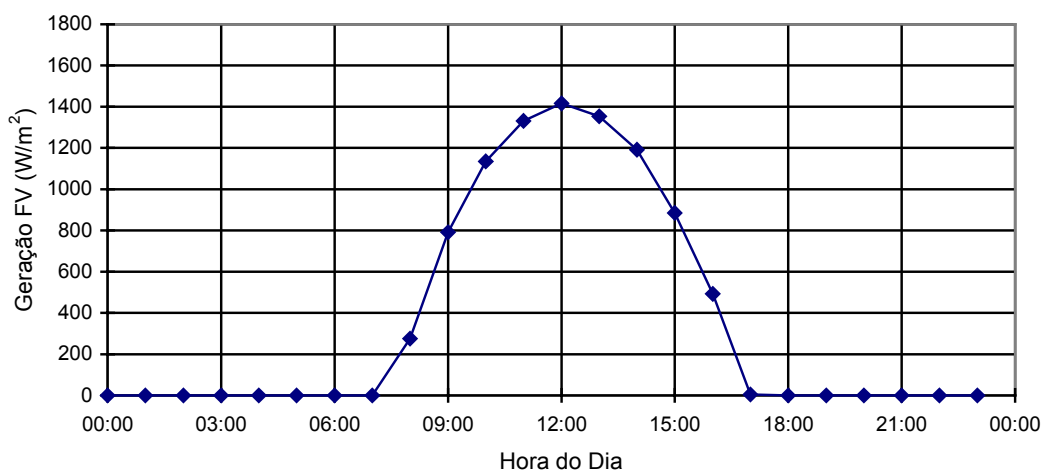


Figura 18: Curva de geração solar para um dia limpo do mês de dezembro (dia 02/12/01), para a cidade de Florianópolis, medida na planta FV da Universidade Federal de Santa Catarina, considerando as superfícies inclinadas a 27° e voltadas para o norte geográfico.

A geração solar no mês de dezembro ocorre das 6 horas até às 18 horas, atingindo seu valor máximo ao meio dia, horário correspondente à maior incidência solar. Na figura 8, correspondente à geração solar no mês de junho, esta ocorre nos períodos entre as 7:00 e 17h, atingindo seu maior valor, também ao meio dia.

GERAÇÃO FV OBTIDA ATRAVÉS DE DADOS SATÉLITE

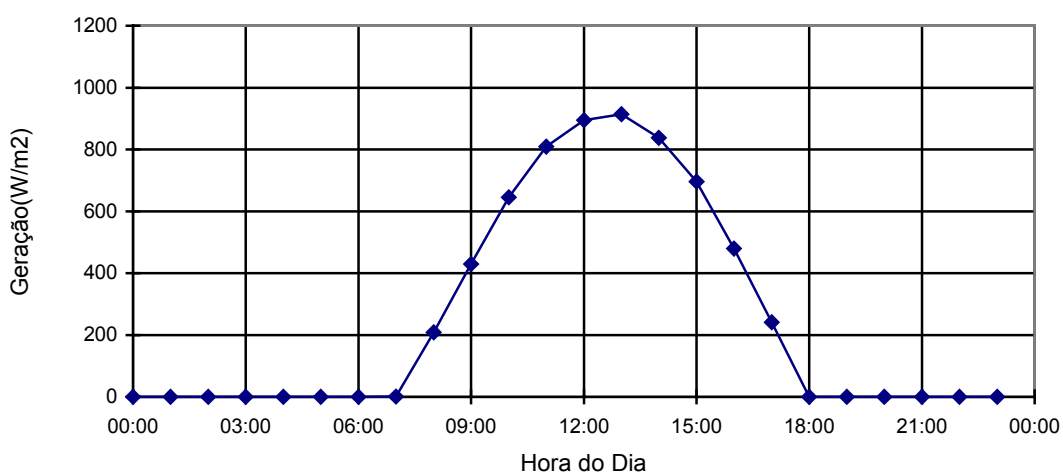


Figura 19: Curva de geração solar para um dia limpo do mês de junho (dia 04/06/01) para a cidade de Florianópolis, medida na estação da Universidade Federal de Santa Catarina, considerando as superfícies inclinadas a 27° e voltadas para o norte geográfico.

4.2.1 CÁLCULO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E ÁREA REQUERIDA

Foram calculados os valores de geração fotovoltaica para os dois setores da cidade de Florianópolis, utilizando os três estudos de caso e seis tecnologias fotovoltaicas comercialmente disponíveis. Para isso, foram utilizadas as equações descritas no capítulo 3, referente à metodologia, e os valores de eficiência dos módulos (EFF_{NOCT}), apresentados na tabela 3, considerando a temperatura de operação de $45^{\circ}C$. Estes valores são os mesmos apresentados para EFF_{NOCT} na tabela 2, descrita no capítulo referente à metodologia aplicada.

Tabela 3: Valores de EFF_{NOCT} das tecnologias fotovoltaicas utilizadas para os estudos de caso.

Tecnologia	EFF_{NOCT} (%)	Tecnologia	EFF_{NOCT} (%)
m-Si	12,42	CdTe	6,62
a-Si	6,30	CIS	7,46
p-Si	10,67	HIT	16,16

4.2.1.1 SETOR JURERÊ

Para este setor residencial foram calculados os valores de geração solar fotovoltaica para as seis tecnologias FV consideradas e para os três estudos de caso: o primeiro considera as superfícies dos painéis como horizontais, o segundo as considera orientadas para o norte e com inclinação igual a 27° e o terceiro considera as condições reais das coberturas edificadas e avalia as questões de sombreamento.

4.2.1.1.1 Primeiro Estudo de Caso – Superfícies Planas e Horizontais

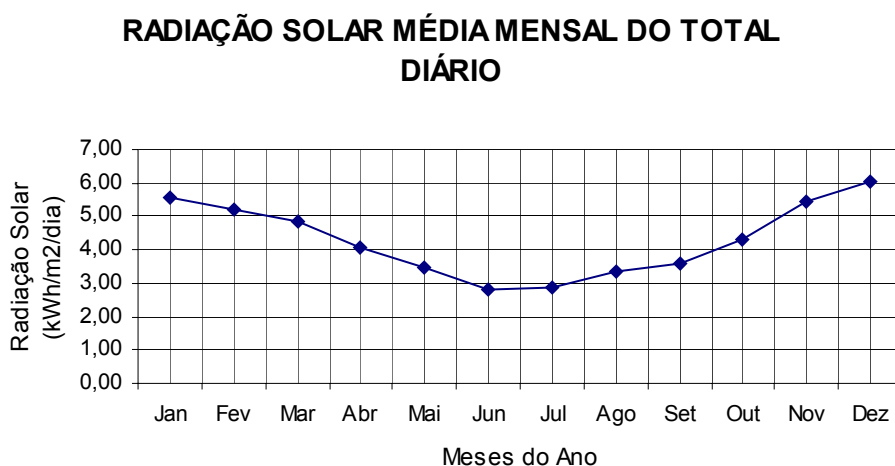
O primeiro estudo de geração solar fotovoltaica, para o setor Jurerê, foi realizando considerando as coberturas das edificações como planas e horizontais.

A tabela 4 mostra os valores das médias diárias mensais de radiação solar para os 12 meses do ano.

Tabela 4: Dados de radiação solar para superfícies planas e horizontais, na cidade de Florianópolis.

Mês	Radiação = i (kWh/m ² /mês)	Mês	Radiação = i (kWh/m ² /mês)
Janeiro	166	Julho	88
Fevereiro	138	Agosto	103
Março	145	Setembro	107
Abril	127	Outubro	127
Maio	110	Novembro	166
Junho	86	Dezembro	188
Média diária mensal	132		
G_{POA} (kWh/m²/ano)	1.582		

A figura 20 mostra a curva de incidência de radiação solar média mensal do total diário para superfícies horizontais nos 12 meses do ano.

**Figura 20:** Curva de radiação solar, média mensal do total diário, considerando as superfícies como horizontais, para a cidade de Florianópolis.

Conforme a figura 20, a incidência de radiação é maior nos meses de Janeiro e Dezembro e atinge o seu menor valor no mês de Junho.

A radiação média anual (G_{POA}) foi obtida a partir das radiações médias diárias mensais.

Para o estudo comparativo entre geração FV e consumo, foram utilizados os dados de consumo anual de energia, do setor residencial e o dado de radiação solar anual para o plano horizontal do painel, apresentado na tabela 4. O valor de consumo energético anual é o

mesmo utilizado para o cálculo de geração fotovoltaica nos três casos deste setor e para as seis tecnologias FV estudadas.

Para as duas cidades, independentemente dos três estudos de casos, foram considerados os mesmos valores de eficiência do sistema inversor (N_{EL}), este correspondendo a 90%. As variáveis de cálculo entre as cidades e os setores foram: a área total de cobertura (A) e o consumo energético (E), que variam de setor para setor, a radiação solar (G_{POA}), que varia de cidade para cidade, e a eficiência do módulo (E_{FF}), que varia de tecnologia para tecnologia.

Através da equação 1, apresentada no capítulo referente à metodologia, e utilizando os dados acima, foi calculada potência instalada necessária para que o sistema seja auto-suficiente em termos de energia.

Conhecendo a potência necessária para suprir todo o consumo do setor e utilizando a equação 2, descrita na metodologia, foi verificada a quantidade de área requerida para a implementação deste sistema, utilizando as seis tecnologias FV disponíveis no mercado.

Na tabela 5, estão apresentados os valores calculados da potência instalada necessária para a auto suficiência do sistema, a área de cobertura requerida para a instalação desta, de acordo com cada tecnologia e o percentual de suprimento do consumo através da utilização desta energia gerada.

Tabela 5: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Jurerê da cidade de Florianópolis, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o primeiro estudo de caso (superfícies na horizontal).

DADOS DE ENTRADA					VALORES CALCULADOS		
$A_{ESTIMADA}$ (m^2)	G_{POA} ($kWh/m^2/ano$)	E (GWh/ano)	N_{EL} (%)	Tecnologias	P_{CC} (kWp)	$A_{REQUERIDA}$ (m^2)	% de Suprimento do Consumo
256.523	1.582	21	90	m-Si	14.964	120.485	213
				a-Si		237.527	108
				p-Si		140.246	183
				CdTe		226.045	113
				CIS		200.593	127
				HIT		92.600	277

Calculados os valores de área requerida para a implementação de um sistema auto-suficiente, obtidos com a utilização das seis tecnologias fotovoltaicas comercialmente disponíveis, foram obtidos os valores de percentual de suprimento do consumo energético para cada tecnologia, neste primeiro estudo de caso para o setor Jurerê.

Com base nestes valores pode-se concluir que o setor Jurerê, para o primeiro estudo de caso, utilizando as seis tecnologias, possui mais área de cobertura disponível para a implementação de um sistema auto-suficiente, do que a necessária. Mesmo com a utilização da tecnologia menos eficiente do mercado (a-Si), o sistema conseguiria suprir todo o consumo do setor e ainda seria capaz de exportar 8% de energia excedente para outra área adjacente. No melhor dos casos, com a utilização da tecnologia HIT, a mais eficiente, o sistema conseguiria um excedente de energia de 177% do consumo do setor.

4.2.1.1.2 Segundo Estudo de Caso – Superfícies Inclinadas a 27 Graus

O segundo estudo de caso, do setor Jurerê, considera para cálculo de geração de energia solar fotovoltaica as coberturas inclinadas a 27^0 e orientadas para o norte geográfico.

A tabela 6 apresenta os valores das médias diárias mensais de radiação solar para os 12 meses do ano, para esta condição de inclinação e orientação para a cidade de Florianópolis.

Tabela 6: Dados de radiação para superfícies inclinadas a 27 graus e orientadas para o norte geográfico, na cidade de Florianópolis.

Mês	Radiação = i (kWh/m ² /mês)	Mês	Radiação = i (kWh/m ² /mês)
Janeiro	162	Julho	106
Fevereiro	143	Agosto	116
Março	152	Setembro	112
Abril	145	Outubro	128
Maio	135	Novembro	162
Junho	106	Dezembro	179
Média diária mensal	140		
G_{POA} (kWh/m²/ano)	1.675		

A figura 21 é referente à curva de radiação incidente no plano do painel, considerando os painéis inclinados a 27° , inclinação correspondente à latitude local, e orientados para o norte geográfico.

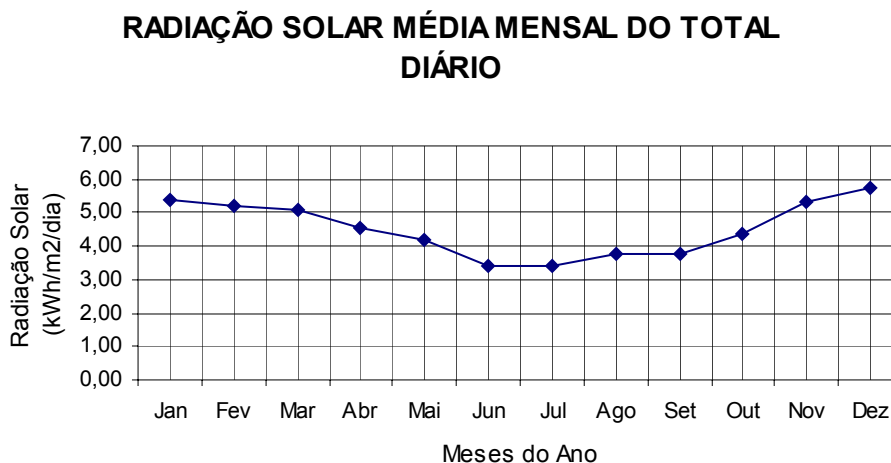


Figura 21: Curva de radiação solar, média mensal do total diário, considerando as superfícies inclinadas a 27 graus e voltadas para o norte geográfico.

Assim como observado na figura 20, a incidência de radiação solar, para a figura 21 também é maior nos meses de Janeiro e Dezembro e atinge o seu menor valor no mês de Junho. Esta distribuição dos módulos FV apresenta um rendimento, em termos de radiação solar, de 1% com relação ao módulos na horizontal.

Através do cálculo da potência instalada necessária para a auto suficiência do sistema, dos valores de área requerida para esta potência e considerando as seis tecnologias analisadas, foram obtidos os valores de percentual de suprimento do consumo, considerando o segundo estudo de caso do setor Jurerê. Estes valores foram apresentados na tabela 7.

Tabela 7: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Jurerê da cidade de Florianópolis, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o seg estudo de caso (superfícies com inclinação igual à latitude local e voltadas para o norte geográfico).

DADOS DE ENTRADA					VALORES CALCULADOS		
$A_{ESTIMADA}$ (m^2)	G_{POA} ($kWh/m^2/ano$)	E (GWh/ano)	N_{EL} (%)	Tecnologias	P_{CC} (kWp)	$A_{REQUERIDA}$ (m^2)	% de Suprimento do Consumo
256.523	1.675	21	90	m-Si	14.136	113.820	225
				a-Si		224.388	114
				p-Si		132.488	195
				CdTe		213.541	120
				CIS		189.496	135
				HIT		87.478	293

O setor Jurerê possui uma área de cobertura disponível de 256.523 m^2 . Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que todas as tecnologias fotovoltaicas estudadas poderiam tornar este sistema auto-suficiente, em termos de quantidade de energia. No pior dos casos, ou seja, com a utilização da tecnologia a-Si o sistema, além de suprir todo o consumo do setor, poderia exportar o excedente de 14% da energia gerada. No melhor dos casos, com a utilização da tecnologia HIT, o sistema conseguiria um excedente de energia de 193% com relação ao consumo do setor.

4.2.1.1.3 Terceiro Estudo de Caso – Condições Reais das Edificações

O terceiro estudo de caso, no setor Jurerê, considera para cálculo de geração de energia solar fotovoltaica as coberturas com inclinações e orientações reais. Estes valores foram obtidos através de uma amostra, como descrito no capítulo 3, referente à metodologia.

A tabela 8 mostra os valores de área real, calculados a partir da amostra e de área estimada, calculados de forma manual, o coeficiente de variação entre a área estimada e a área real, a inclinação das coberturas de cada edificação da amostra, bem como suas respectivas médias.

Tabela 8: Dados referentes à inclinação e às áreas reais e estimadas das coberturas individuais selecionadas pela amostra para o setor Jurerê da cidade de Florianópolis.

EDIFICAÇÕES - ÁREAS DE COBERTURA E INCLINAÇÕES				
Amostra	Área Real (m ²)	Área Estimada (m ²)	Relação entre área estimada e real	Ângulo (graus)
1	294	256	0,87	22
2	280	149	0,54	30
3	238	201	0,84	37
4	460	348	0,76	10
5	456	262	0,57	28
6	263	202	0,77	19
7	212	122	0,57	31
8	194	168	0,87	22
9	188	150	0,80	28
10	248	222	0,90	20
Média	284	208	0,74	24

Os valores de área real e área estimada diferem em 27%. Em todos os casos observados, na amostra do setor Jurerê, a área estimada foi menor do que a área real. Isso, possivelmente se deve ao fato de que a metodologia utilizada para cadastro das edificações não adota uma escala real, portanto torna os valores imprecisos. Outra possível causa é o fato de as edificações poderem ter sofrido acréscimos no decorrer dos anos e estes acréscimos não foram quantificados, ou até mesmo pelo fato de que os projetos originais não foram devidamente executados. Por conta desta variação significativa entre os valores, foram utilizados para base de cálculo somente os valores de área estimada, levando a resultados mais conservativos.

A tabela 9 apresenta os valores de áreas de cobertura real (m²) em função da sua orientação para as edificações da amostra, bem como seus valores médios.

Tabela 9: Dados referentes às áreas reais das coberturas das edificações da amostra, equivalentes a cada orientação, bem como seus valores médios, para o setor Jurerê da cidade de Florianópolis.

EDIFICAÇÕES – ORIENTAÇÕES DAS COBERTURAS (m ²)									
Amostra	Norte (N)	Sul (S)	Leste (L)	Oeste (O)	Nordeste (NE)	Noroeste (NO)	Sudeste (SE)	Sudoeste (SO)	Horizontais (H)
1	87	170	27	10	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	176	20	20	63	0
3	0	0	0	0	116	1	1	120	0
4	250	76	63	72	0	0	0	0	0
5	104	136	4	57	0	98	57	0	0
6	0	0	80	80	0	0	0	0	103
7	98	115	0	0	0	0	0	0	0
8	85	56	16	37	0	0	0	0	0

9	65	123	0	0	0	0	0	0	0
10	70	54	62	62	0	0	0	0	0
Média	76	73	25	32	29	12	8	18	10

Como a quantidade de área (m^2) para cada orientação foi obtida através da área real e esta análise considerou a área estimada, os valores de área real, para cada orientação foram multiplicados pelo valor da relação entre área estimada e área real, de 0,74, mostrado na tabela 8.

Através do programa *lightscape*, descrito na metodologia, foi obtida a média de área real anual de sombreamento para cada edificação (m^2). Foi verificado que cada edificação recebe por ano uma média real de sombreamento de 28 m^2 , como a área média real das edificações é de 284 m^2 este valor de área sombreada corresponde a 10% da média de área real das coberturas. Como esta área de sombreamento foi calculada a partir da área real,, este valor também foi multiplicado pela relação de 0,74, resultando em um valor médio anual estimado de sombreamento de 21 m^2 . Para obter a média anual estimada de área sombreada para cada orientação foi verificada uma relação entre área estimada total de sombra e área estimada da edificação, que é de 0,10. Este valor foi multiplicado pela média de área estimada de cada orientação, resultando na quantidade de sombra por orientação (m^2). Os valores de áreas úteis por orientação foram resultado da subtração entre média de área estimada por orientação e média de área sombreada por edificação.

A tabela 10 apresenta os valores de média de área real para cada orientação considerada útil, o valor da relação entre real e estimado, os valores de média de área estimada para cada orientação, o valor da relação entre média estimada de sombra por edificação e média de área estimada por edificação, média estimada de sombra para cada orientação da edificação e a média estimada útil por edificação, considerando as orientações úteis e descontando as áreas sombreadas.

Tabela 10: Valores das médias de área estimada por edificação para cada orientação considerada útil, obtidas através da relação entre média estimada e média real, relação entre média de área estimada sombreada e média de área estimada total, média estimada de área sombreada por orientação e média de área útil para a implementação do sistema FV, por edificação do setor Jurerê da cidade de Florianópolis.

Orientações úteis	Área real (m ²)	Coef. de correlação entre real e estimada	Área estimada (m ²)	Coef. de variação entre média estimada total sombreada e média total da edificação.	Área de sombra estimada (m ²)	Área estimada útil (m ²)
N	76	0,74	56	0,10	6	50
L	25		19		2	17
O	32		24		2	21
NE	29		22		2	20
NO	12		9		1	8
H	10		7		1	7
Total	184		137		14	123

Com base nos valores de área útil, foi calculada a geração FV para cada orientação, considerando a inclinação média de 24⁰ e o consumo médio por edificação de 17.296 kWh/ano, calculado a partir da área estimada total do setor, do consumo energético anual do setor e da média de área estimada por edificação.

A tabela 11 apresenta os valores anuais de radiação solar para cada uma das orientações consideradas.

Tabela 11: Dados de radiação solar para superfícies inclinadas a 24⁰(inclinação média das coberturas da amostra), considerando todas as orientações observadas nas amostras para o setor Jurerê da cidade de Florianópolis.

Orientações	N	S	L	O	NE	NO	SE	SO	H
G _{POA} (kWh/m ² /ano)	1.651	1.411	1.540	1.540	1.618	1.618	1.445	1.445	1.582

Como mencionado na metodologia, foram desconsideradas as orientações S, SE e SO por tratarem-se de orientações que teriam uma geração de energia de cerca de 10% inferior à geração obtida pela orientação ideal. Estas orientações teriam uma geração significativa, mas como primeiramente foi constatado que mesmo desconsiderando-as o sistema teria uma geração maior do que o consumo energético do setor, estas foram desconsideradas. No caso de áreas com uma limitação maior de área de cobertura, que não é o caso do setor Jurerê,

poderia ser vantajosa a utilização das coberturas voltadas para estas orientações. Com esta verificação, 35% das áreas de cobertura não seriam aproveitadas para a implementação de um sistema FV, no presente estudo.

Os valores de radiação solar foram calculados considerando uma inclinação dos módulos de 24° , valor médio dos ângulos de inclinação das coberturas, como foi apresentado na tabela 8.

Como observado na tabela 11, cada orientação equivale a um valor médio diário anual de radiação solar (G_{POA}) em $kWh/m^2/ano$, pois o desvio azimutal tornou-se uma variável. Para que pudesse ser calculada a potência FV total instalada por edificação, necessária para suprir todo o consumo médio respectivo, considerando as seis orientações úteis, foi multiplicado o percentual da média estimada útil, de cada orientação, pela radiação correspondente.

A tabela 12 apresenta as médias anuais de radiação solar para cada orientação considerada útil, a média estimada útil para cada orientação, os valores percentuais de área para cada orientação, com relação à área estimada útil total e a média anual de radiação para cada orientação, considerando os percentuais de área de cobertura útil.

Tabela 12: Valores das médias anuais de radiação solar para as orientações úteis, percentual da área estimada útil para cada orientação e valores das médias diárias anuais de radiação solar, considerando os percentuais de área para as correspondentes orientações. Estudo real das amostras, com inclinação igual a 24° , para o setor Jurerê da cidade de Florianópolis.

Orientações	G_{POA} ($kWh/m^2/ano$)	Média estimada útil (m^2)	% da média estimada útil	G_{POA} por orientação ($kWh/m^2/ano$)
N	1.651	50	41	679
L	1.540	17	14	211
O	1.540	21	17	266
NE	1.618	20	16	257
NO	1.618	8	6	105
H	1.566	7	6	87
Total	-----	123	100	1.605

Através da soma das radiações por área foi obtido o valor de G_{POA} , considerando as áreas disponíveis para receber esta radiação solar, para as diferentes orientações.

Com base neste valor de radiação solar, no valor médio de consumo energético por edificação e com base no valor percentual de eficiência do sistema inversor, foi calculada a potência total a ser instalada por edificação, para suprir todo o consumo, considerando as situações reais destas.

Através da utilização das seis tecnologias FV disponíveis no mercado, conforme apresentado na tabela 3 e com a utilização da equação 2, descrita na metodologia, foi calculado o valor de área requerida para a instalação desta potência para cada uma das seis tecnologias FV disponíveis no mercado. A partir destes valores, foi possível calcular o percentual de suprimento do consumo por edificação do setor Jurerê, considerando o terceiro estudo de caso para a amostra. Estes resultados foram apresentados na tabela 13.

Tabela 13: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Jurerê da cidade de Florianópolis, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o terceiro estudo de caso (condições reais).

DADOS DE ENTRADA					VALORES CALCULADOS		
A ESTIMADA ÚTIL (m^2)	G_{POA} ($kWh/m^2/ano$)	E (kWh/ano)	N_{EL} (%)	Tecnologias	P_{CC} (kWp)	$A_{REQUERIDA}$ (m^2)	% de Suprimento do Consumo
123	1.605	17.296	90	m-Si	12	96	127
				a-Si		190	65
				p-Si		112	109
				CdTe		181	68
				CIS		161	77
				HIT		74	166

Através desta análise que corresponde à média do percentual de suprimento do consumo por edificação do setor Jurerê, foi observado que com a utilização das três tecnologias mais eficientes, ou seja: HIT, m-Si e p-Si, o sistema conseguiria gerar mais energia do que o consumo do setor, ou seja, além de suprir todo o consumo do setor, seria

capaz de exportar a energia excedente. Com as outras três tecnologias, a-Si, CdTe e CIS, o sistema não conseguiria atingir a auto-suficiência.

Este estudo de percentual de suprimento do consumo energético realizado para a amostra, corresponde aos mesmos valores percentuais de suprimento do consumo para o terceiro estudo de caso do setor Jurerê como um todo. As variáveis nesta situação foram a área útil e a área requerida para a implementação de um sistema auto-suficiente. Para obter estes valores, foi feita uma correção no valor referente à área estimada total do setor, que equivale a 256.523 m², pois esse valor não considera a área sombreada. Este valor foi multiplicado por um coeficiente de correlação entre área útil e área estimada da amostra, de 0,59, resultando em uma área estimada útil de 151.349 m², para todo o setor Jurerê.

4.2.1.2 SETOR CENTRO

Para este setor central foram calculados os valores de geração solar fotovoltaica para os três estudos de caso: o primeiro considerando as superfícies dos painéis como horizontais, o segundo considerando-as voltadas para o norte e com inclinação igual a 27° e o terceiro considerando-as de acordo com as condições reais das coberturas edificadas e avaliando as questões de sombreamento.

4.2.1.2.1 Primeiro Estudo de Caso – Superfícies Planas e Horizontais

O primeiro estudo de caso para cálculo de geração solar, no setor centro, considera as superfícies como planas e horizontais. Para o estudo, foram considerados os dados de radiação solar da tabela 4, para cidade de Florianópolis. Estes valores são os mesmos valores de radiação utilizados para o cálculo no setor Jurerê para o primeiro caso. Isso se deve ao fato de que a radiação não varia muito de um setor para o outro da cidade, devendo ser levada em

consideração a orientação das placas fotovoltaicas, a inclinação destas e a cidade onde vai ser implementado o sistema.

Considerando os valores de consumo energético do setor Centro, obtidos na tabela 2, e com os dados calculados e fornecidos, foi calculada a quantidade de energia solar fotovoltaica que o sistema hipotético poderia gerar para este primeiro estudo. Os valores de consumo energético, neste caso, foram os mesmos utilizados para o cálculo de geração fotovoltaica nos três casos deste setor.

Através da equação 1, descrita na metodologia, utilizando os valores de radiação e de consumo energéticos, obteve-se a potência instalada necessária para que o sistema seja auto – suficiente, em termos de quantidade de energia. Com o valor da potência instalada necessária, foi calculada a área requerida para este sistema através da equação 2 e considerando as seis tecnologias adotadas. Com base nestas informações, foram calculados os valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor, através da utilização deste sistema FV hipotético. Estes valores foram apresentados na tabela 14.

Tabela 14: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Centro da cidade de Florianópolis, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o primeiro estudo de caso (superfícies na horizontal).

DADOS DE ENTRADA					VALORES CALCULADOS		
$A_{ESTIMADA}$ (m^2)	G_{POA} ($kWh/m^2/ano$)	E (GWh/ano)	N_{EL} (%)	Tecnologias	P_{CC} (kWp)	$A_{REQUERIDA}$ (m^2)	% de Suprimento do Consumo
229.082	1.582	27	90	m-Si	18.840	151.694	151
				a-Si		299.053	77
				p-Si		176.573	130
				CdTe		284.597	80
				CIS		252.551	91
				HIT		116.586	196

Através da análise dos valores de percentual de suprimento do consumo no setor Centro, observou-se que, com a utilização das três tecnologias mais eficientes: HIT, m-Si e p-Si, o sistema conseguiria atingir a auto-suficiência, em termos de quantidade de energia e

ainda poderia exportar a energia excedente para outro alimentador. O restante das tecnologias não conseguiria atingir este resultado. Com a utilização da tecnologia menos eficiente, a a-Si, o sistema ainda assim, conseguiria suprir 77% do consumo do setor.

4.2.1.2.2 Segundo Estudo de Caso – Superfícies Inclinadas a 27 Graus

Para cálculo da geração solar fotovoltaica do setor Centro, o segundo estudo de caso considera as superfícies como inclinadas a 27° e orientadas para o norte geográfico.

Este estudo utilizou os dados de radiação solar, obtidos na tabela 6 e os dados de consumo energético do setor Centro, obtidos na tabela 2.

Com base nos valores de radiação solar, consumo energético e área total estimada de cobertura do setor, foi calculada a potência de geração fotovoltaica ideal para a auto-suficiência deste setor. Com o valor da potência instalada necessária, foi calculada a área requerida para que o sistema consiga gerar toda a energia consumida pelo setor. Para isso foi utilizada a equação 2. Foram consideradas para cálculo as seis tecnologias de painéis fotovoltaicos disponíveis no mercado. A partir destes cálculos, foi verificado o percentual de suprimento do consumo energético do setor, para cada tecnologia.

A tabela 15 descreve os dados de entrada utilizados para os cálculos, bem como os valores de potência instalada necessária, área requerida para a instalação desta potência e valores percentuais de suprimento do consumo, para o segundo estudo de caso do setor Centro.

Tabela 15: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Centro da cidade de Florianópolis, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o segundo estudo de caso (superfícies com inclinação igual à latitude local e voltadas para o norte geográfico).

DADOS DE ENTRADA					VALORES CALCULADOS		
$A_{ESTIMADA}$ (m^2)	G_{POA} ($kWh/m^2/ano$)	E (GWh/ano)	N_{EL} (%)	Tecnologias	P_{CC} (kWp)	$A_{REQUERIDA}$ (m^2)	% de Suprimento do Consumo
229.082	1.675	27	90	m-Si	17.798	143.303	160
				a-Si		282.512	81
				p-Si		166.806	137
				CdTe		268.855	85
				CIS		238.582	96
				HIT		110.138	208

Através da análise dos valores de percentual de suprimento do consumo no setor Centro, utilizando o segundo estudo de caso, pode-se observar que assim como no primeiro estudo de caso do setor Centro, o sistema conseguiria atingir a auto-suficiência, em termos de quantidade de energia e ainda poderia exportar a energia excedente para outro alimentador, com a utilização das tecnologias mais eficientes, ou seja: HIT, m-Si e p-Si. O restante das tecnologias não conseguiria atingir este resultado, mas com a utilização da tecnologia menos eficiente, a-Si, o sistema conseguiria, ainda assim, suprir 81% do consumo do setor.

Foi verificado um aumento percentual de variação de energia gerada pelo sistema, entre o segundo estudo de caso (ideal) e o primeiro de aproximadamente 5%.

4.2.1.2.3 Terceiro Estudo de Caso – Condições Reais das Edificações

O terceiro estudo de caso, do setor Centro, assim como o terceiro estudo de caso para o setor Jurerê, considera para cálculo de geração de energia solar fotovoltaica as coberturas com inclinações e orientações reais, considerando as questões de sombreamento das edificações. Estes valores foram obtidos através de uma amostra, como descrito no capítulo 3, referente à metodologia aplicada.

A tabela 16 mostra os valores de área real, obtidos através da amostra, os valores de área estimada, calculados de forma manual, através das plantas de quadra, o valor da relação

entre a área estimada e a área real, a inclinação das coberturas de cada edificação da amostra, bem como suas respectivas médias.

Tabela 16: Dados referentes à inclinação e às áreas reais e estimadas das coberturas individuais selecionadas pela amostra para o setor Centro da cidade de Florianópolis.

EDIFICAÇÕES - ÁREAS DE COBERTURA E INCLINAÇÕES				
Amostra	Área Real (m²)	Área Estimada (m²)	Relação entre área estimada e real	Ângulo (graus)
1	357	1.098	3	0
2	420	930	2	0
3	195	270	1	0
4	210	520	2	0
5	182	330	2	0
6	195	1442	7	0
7	755	1520	2	0
8	438	721	2	0
9	275	610	2	0
10	154	271	2	0
Média	318	771	2	0

Foi considerada uma inclinação média de zero grau para as coberturas do setor Centro, pelo fato destas serem na maior parte de fibrocimento, com uma inclinação muito baixa.

Em média, as áreas reais obtidas representam menos da metade (41%) das áreas estimadas. Em todos os casos, a área real é menor do que a área estimada, ao contrário do setor Jurerê. Isso se deve ao fato de que para o cálculo da área estimada foram consideradas as áreas edificadas de cada edificação e para o cálculo da área real de cobertura, foram consideradas somente as áreas de cobertura, que no setor central é relativamente menor do que a área edificada. Nestes setores há um predomínio de áreas comuns abertas nos últimos pavimentos das edificações. Desta forma, as áreas consideradas de cobertura, na grande maioria das edificações, foram consideradas apenas as áreas dos reservatórios e das casas de máquina. Por conta desta variação significativa entre os valores, foram utilizados para base de cálculo somente os valores de área real, levando a resultados mais conservativos.

Como observado na amostra, foi considerada uma média de inclinação das coberturas das edificações do setor Centro de zero grau. Por este motivo, a quantidade de radiação

incidente em uma superfície foi considerada a partir do plano horizontal dos módulos. Para isso, foi considerado que a média total de área real das edificações está no plano horizontal, onde o desvio azimutal deixa de fazer sentido prático.

A quantidade média anual de radiação incidente em um plano (G_{POA}) para a cidade de Florianópolis, considerando as superfícies dos módulos na horizontal, como já observado no segundo estudo de caso, a partir da tabela 6 é de $1582 \text{ kW/m}^2/\text{ano}$.

Através do programa *lightscape*, descrito na metodologia, foi obtida a média de área real anual de sombreamento para cada edificação (m^2). Foi verificado que cada edificação recebe por ano uma média real de sombreamento de 37 m^2 . Este valor médio anual de sombreamento foi relativamente maior do que o obtido para a amostra do setor Jurerê pelo fato de que no setor Centro a altura das edificações varia de um a 14 pavimentos, fazendo com que a quantidade de sombra que uma edificação gera sobre a outra seja maior.

Para o cálculo de geração FV considerando as questões reais das edificações, foi considerado o valor médio de área útil. Este valor foi obtido através da subtração do valor médio de área real e o valor médio anual de sombreamento, resultando em uma média de área útil de 281 m^2 por edificação para a instalação do sistema FV.

O consumo médio por edificação foi calculado a partir da área estimada total do setor, do consumo energético anual do setor e da média de área estimada por edificação, resultando num valor de 90.318 kWh/ano .

A partir dos valores médios, descritos na tabela 16, de radiação solar anual, de consumo energético por edificação e com base no valor percentual de eficiência do sistema inversor, foi calculada a potência instalada total, necessária para suprir todo o consumo médio anual de uma edificação. Para isto, foi utilizada a equação 1, descrita no capítulo 3 e referente à metodologia aplicada. Através da utilização das seis tecnologias FV disponíveis no

mercado, conforme citado no capítulo 2, foi calculado o percentual médio de suprimento do consumo energético por edificação para cada tecnologia correspondente, considerando as situações reais das edificações. Estes valores foram apresentados na tabela 17.

Tabela 17: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Centro da cidade de Florianópolis, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o terceiro estudo de caso (condições reais).

DADOS DE ENTRADA					VALORES CALCULADOS		
A _{REAL ÚTIL} (m ²)	G _{POA} (kWh/m ² /ano)	E (kWh/ano)	N _{EL} (%)	Tecnologias	P _{CC} (kWp)	A _{REQUERIDA} (m ²)	% de Suprimento do Consumo
281	1582	90.318	90	m-Si	63	511	55
				a-Si		1.007	28
				p-Si		594	47
				CdTe		958	29
				CIS		850	33
				HIT		392	72

Através da análise dos valores percentuais de suprimento do consumo no setor Centro, considerando o terceiro estudo de caso, foi observado que o sistema não conseguiria suprir todo o consumo do setor com nenhuma das tecnologias analisadas. Por outro lado, no pior dos casos, conseguiria gerar 28% da energia consumida. Isso representaria uma importante contribuição para a concessionária local, uma vez que estaria auxiliando na redução da sobrecarga da rede em um alimentador que possui pico diurno, aumentando a capacidade da rede local, além da energia gerada.

4.2.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA A CIDADE DE FLORIANÓPOLIS

Confrontando os valores de consumo energético e geração fotovoltaica nos setores estudados, verificou-se de que forma o sistema poderia contribuir com a rede elétrica pública.

A figura 22 mostra os dados de geração fotovoltaica, demanda de energia e demanda menos geração FV no alimentador INE 02, correspondente à área de Jurerê.

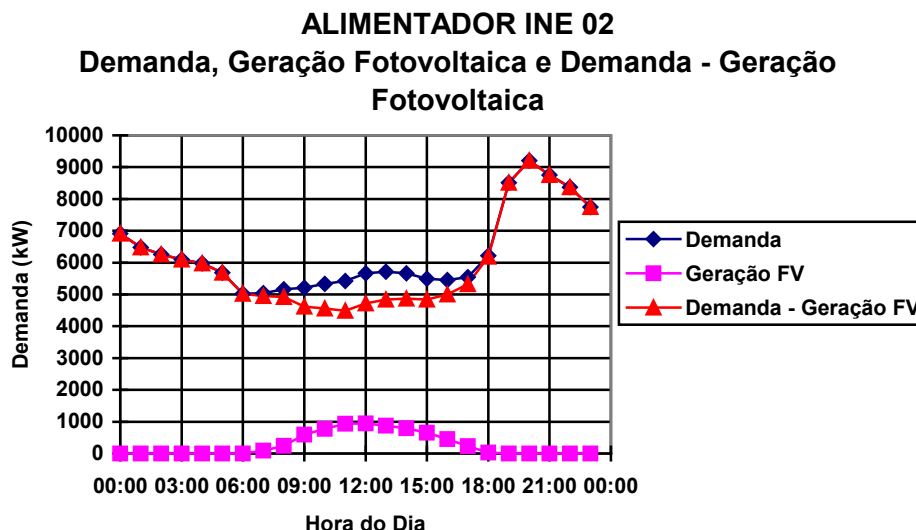


Figura 22: Curvas de demanda, geração solar e demanda menos geração no alimentador do setor Jurerê da cidade Florianópolis, considerando a potência instalada como 20% da demanda máxima histórica do setor.

Como pode ser observado na figura 16 o pico de demanda do setor Jurerê não coincide com o de geração fotovoltaica. O pico máximo deste setor ocorre à noite, por volta das 20 horas, enquanto que o pico de geração ocorre durante o dia. Portanto, o sistema não poderia contribuir para a redução do pico de demanda, desta área, pois as curvas de geração de energia e de demanda não são coincidentes, entretanto, poderia contribuir significativamente na quantidade de energia gerada.

A tabela 18 apresenta uma síntese dos percentuais de suprimento do consumo no setor Jurerê, considerando os três estudos de caso e as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis no mercado.

Tabela 18: Valores percentuais de suprimento do consumo de energia no setor Jurerê, através da utilização de sistemas FV em toda a área de cobertura das edificações, considerando os três estudos de caso e as seis tecnologias FV disponíveis no mercado.

Estudos de Caso	Percentual de suprimento do consumo no setor Jurerê					
	m-Si	a-Si	p-Si	CdTe	CIS	HIT
1 ^o	213	108	183	113	127	277
2 ^o	225	114	195	120	135	293
3 ^o	127	65	109	68	77	166

Conforme observado na tabela 21, o sistema FV no primeiro e no segundo estudo de caso, com a utilização das seis tecnologias, no setor Jurerê, conseguiria suprir todo o consumo do setor e ainda poderia exportar a energia excedente, que no melhor caso chegaria a 193%. No terceiro estudo de caso, correspondente às situações reais das edificações do setor, o sistema FV, conseguiria atingir a auto-suficiência com a utilização das três tecnologias mais eficientes, a HIT, a m-Si e a p-Si. Nestes casos, além de suprir todo o consumo do setor também poderia exportar a energia excedente que, no pior caso seria de 9%. Assim, poderia funcionar como uma mini-usina geradora de energia, que atuaria em paralelo com as centrais convencionais e iria auxiliar na redução da sobrecarga da rede em um alimentador adjacente.

O terceiro estudo de caso, que considera as questões reais de área útil, inclinação e orientação das coberturas das edificações do setor Jurerê apresentou valores percentuais de geração de energia, significativamente menores dos que os obtidos no primeiro e no segundo estudo de caso, valor este na ordem de 43% se comparado com o segundo estudo de caso (ideal).

A figura 23 mostra os dados de geração fotovoltaica, demanda energética e demanda menos geração fotovoltaica no alimentador ICO 07, correspondente ao setor Centro (dia 19/03/02). Neste gráfico, a curva superior refere-se à demanda energética no setor, a inferior corresponde à geração fotovoltaica, considerando 20% da demanda máxima do setor e a intermediária representa à demanda com a geração fotovoltaica, ou seja, a diferença entre elas.

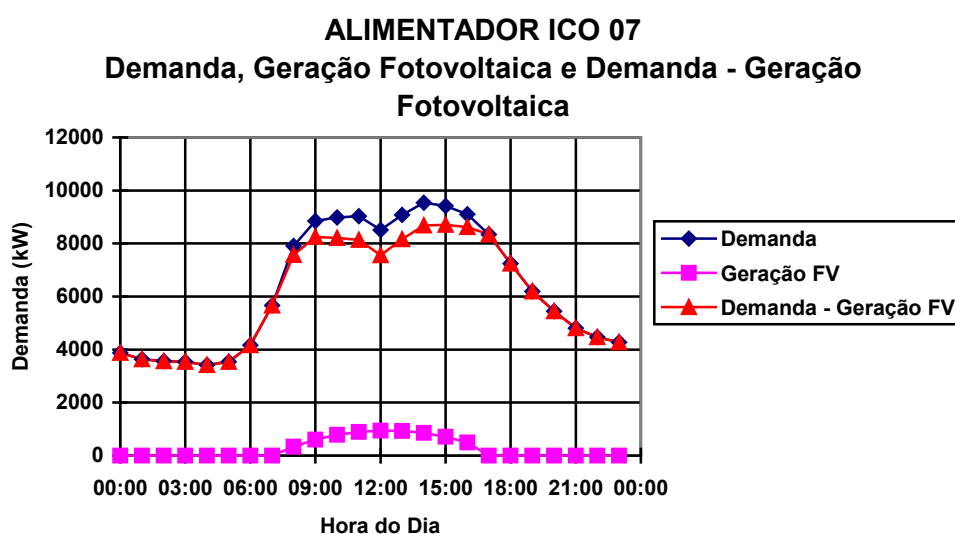


Figura 23: Curvas de demanda, geração solar e demanda menos geração, no setor Centro da cidade de Florianópolis, considerando como potência instalada 20% da demanda máxima histórica do setor.

Observou-se que a demanda diminui significativamente quando há coincidência temporal entre demanda e geração FV. Essa característica é típica de áreas comerciais com elevado consumo de aparelhos de ar condicionado.

A tabela 19 apresenta os valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Centro, considerando os três estudos de caso e as seis tecnologias FV disponíveis no mercado.

Tabela 19: Valores percentuais de suprimento do consumo de energia no setor Centro, através da utilização de sistemas FV em toda a área de cobertura das edificações, considerando os três estudos de caso e as seis tecnologias FV disponíveis no mercado.

Estudos de Caso	Percentual de suprimento do consumo no setor Centro					
	m-Si	a-Si	p-Si	CdTe	CIS	HIT
1 ^o	151	77	130	80	91	196
2 ^o	160	81	137	85	96	208
3 ^o	55	28	47	29	33	72

Conforme observado na tabela acima, o sistema fotovoltaico interligado na rede elétrica do setor Centro, no primeiro e segundo estudo de caso, conseguiria suprir todo o respectivo consumo do setor, com a utilização das tecnologias dos painéis HIT, m-Si e p-Si considerados as tecnologias mais eficientes do mercado. Com o restante das tecnologias, o sistema não conseguiria atingir a auto-suficiência, em termos de quantidade de energia. Para o terceiro estudo de caso, que considera as situações reais das edificações, o sistema não conseguiria tornar-se auto-suficiente com nenhuma das tecnologias analisadas. Por outro lado, por mais que a geração fotovoltaica neste setor, utilizando toda a área de cobertura útil real das edificações, não supra o consumo total deste, ela poderia contribuir significativamente para a redução do pico de demanda. Isto poderia trazer grandes benefícios à concessionária. Estudos de GLD (Gerenciamento pelo Lado da Demanda), considerando a utilização de sistemas FV para a diminuição do pico de demanda, poderiam tornar visíveis os benefícios desta fonte alternativa de energia.

O terceiro estudo de caso, que considera as questões reais de área útil, inclinação e orientação das coberturas das edificações, assim como o terceiro estudo de caso do setor Jurerê, apresentou valores percentuais de geração de energia, significativamente menores do que os valores obtidos no primeiro e no segundo estudo de caso, valor este na ordem de 64 % se comparado com o segundo estudo de caso (ideal). Mesmo atingindo valores relativamente mais baixos, o sistema seria considerado de grande importância para a concessionária, pois no

pior dos casos, conseguiria uma geração equivalente a 28% do consumo correspondente ao setor.

A Figura 24 apresenta os valores de demanda, geração FV e demanda menos geração FV para o dia de maior demanda analisado neste estudo. Os valores de Geração FV foram obtidos considerando que toda a área útil estimada de cobertura do setor centro foi utilizada para a colocação de painéis fotovoltaicos com tecnologia baseada em Silício Amorfo (a-Si).

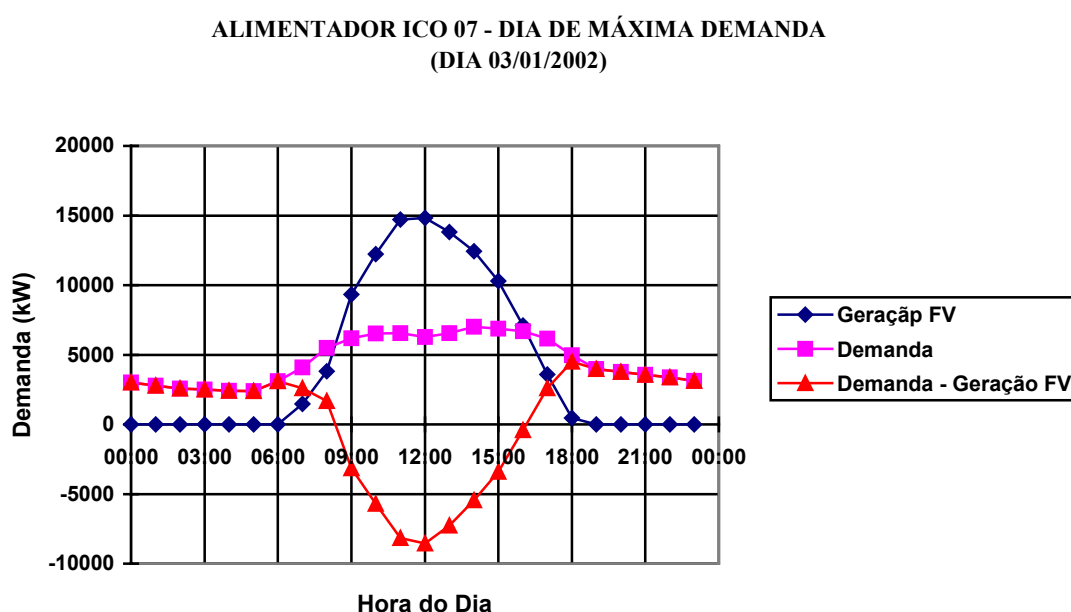


Figura 24: Curva de demanda energética e geração solar fotovoltaica, no setor Centro da cidade de Florianópolis, para um dia limpo, considerando como potência instalada toda a área de cobertura das edificações e a tecnologia FV baseada em a-Si (dia 03/02/2002).

A curva de demanda menos geração fotovoltaica atingiu valores negativos. Isto se deve ao fato de que neste dia selecionado, 03/01/2002¹, a demanda é significativamente menor do que a geração fotovoltaica. Portanto, se fosse utilizada toda a geração de energia fotovoltaica do setor neste alimentador, a demanda entre as 9:00h e às 16h, seria integralmente suprida pela geração FV e ainda sobraria energia para ser injetada em outro

¹ O dia 03/02/2002, corresponde a um dia típico de verão no setor centro, quando a demanda atinge seu valor máximo.

alimentador. No horário de maior incidência solar (12:00H), a geração FV é 2,35 vezes superior ao valor da demanda (Geração FV = 14.829 kW, Demanda = 6.286 kW). Isso significa que, utilizando aproximadamente 4% da área de cobertura da região central da cidade, considerando a inclinação e orientação dos módulos como ideais (segundo estudo de caso) e com a tecnologia menos eficiente, a-Si, seria possível atingir valores de geração FV da ordem de 10% do valor da demanda, valor esse normalmente utilizado em estudos de sistemas fotovoltaicos integrados às edificações e interligados à rede elétrica como um nível de penetração recomendável (HERIG, 2001). Considerando as condições reais das coberturas das edificações do setor (terceiro estudo de caso) esta geração, de 10% do valor da demanda máxima, poderia ser atingida através da utilização de 12% da área útil de cobertura do setor.

4.3 SETORES DA CIDADE DE BELO HORIZONTE

Na cidade de Belo Horizonte foram selecionados três setores aleatórios: um basicamente comercial, outro de caráter residencial e o último de caráter misto.

No setor basicamente comercial, foi selecionada uma área da cidade chamada Hiper Centro, no residencial uma área denominada Floresta e no misto uma área denominada Santa Efigênia.

As fotos aéreas correspondentes a cada região são apresentadas nas figuras 25, 26 e 27, correspondentes ao setor Hiper Centro, Floresta e Santa Efigênia. É possível observar a densidade de ocupação dos setores, bem como os respectivos níveis de arborização.



Figura 25: Vista aérea do setor Hiper Centro da cidade de Belo Horizonte.



Figura 26: Vista aérea do setor Floresta da cidade de Belo Horizonte.



Figura 27: Vista aérea do setor Santa Efigênia da cidade de Belo Horizonte.

Foram verificados os consumos energéticos anuais de cada setor, através de dados fornecidos pela CEMIG, baseados nos alimentadores correspondentes. Cada setor recebe energia elétrica de mais de um alimentador, sendo que em alguns casos um mesmo alimentador pode atender a mais de um setor. O setor Hiper Centro é abastecido pelos alimentadores BHBP 04, BHBP 09, BHBP 10, BHBP 13, BHBP 18, BHCN 01 e BHCN 02. O setor Floresta é abastecido pelos alimentadores BHBP 09, BHBP 13, BHCN 02, BHCN 05, BHCN 46, BHHR 05, BHHR 12, BHMR 13, BHSE 16, BHSE 19, BHSE 20. O setor Santa Efigênia é abastecido pelos alimentadores BHCN 02, BHCN 05, BHCN 46, BHHR 29, BHSE 05, BHSE 06, BHSE 08, BHSE 10, BHSE 11, BHSE 12, BHSE 13, BHSE 14, BHSE 15, BHSE 16, BHSE 17, BHSE 19, BHSE 20, BHSE 21, BHSE 22.

A tabela 20 apresenta os valores de consumo de energia elétrica fornecidos por cada alimentador dos setores. Estes valores correspondem à média anual mensal de consumo energético.

Tabela 20: Valores de consumo energético em cada alimentador dos setores da cidade de Belo Horizonte.

BAIRRO HIPER CENTRO		BAIRRO FLORESTA		BAIRRO SANTA EFIGÊNIA	
Alimentador	Consumo (kWh/mês)	Alimentador	Consumo (kWh/mês)	Alimentador	Consumo (kWh/mês)
BHBP 04	1.804.737	BHBP 09	59.901	BHCN 02	70.816
BHBP 10	1.488.421	BHBP 13	370.124	BHCN 05	2.017.905
BHBP 13	316.825	BHCN 02	127	BHCN 46	472.943
BHBP 18	12.564	BHCN 05	282.196	BHHR 29	15.138
BHCN 01	4.825.243	BHCN 46	506.681	BHSE 05	4.118
BHCN 02	2.129.001	BHHR 05	187.447	BHSE 06	20.202
INDEFINIDO	22.295	BHHR 12	707.630	BHSE 08	44.844
Média Mensal	10.599.086	BHSE 16	6.461	BHSE 10	162.433
Total Anual	127.189.032	BHSE 19	470.263	BHSE 11	507.189
		BHSE 20	838.922	BHSE 12	1.186.618
		Média Mensal	3.429.752	BHSE13	30.738
		Total Anual	41.157.024	BHSE 14	306.064
				BHSE 15	112.078
				BHSE 16	358.488
				BHSE 17	31.363
				BHSE 19	679.199
				BHSE 20	394.813
				BHSE 21	87.690
				BHSE 22	196.826
				Média Mensal	6.699.465
				Total Anual	80.393.580

As figuras 28, 29 e 30 apresentam as curvas de demanda energética dos três setores estudados, para os dias de máxima demanda, respectivamente: Hiper Centro, Floresta e Santa Efigênia. Estes valores foram obtidos através da soma dos valores de demanda dos alimentadores de cada setor.

SETOR HIPER CENTRO- DIA DE MÁXIMA DEMANDA (01/01/2004)

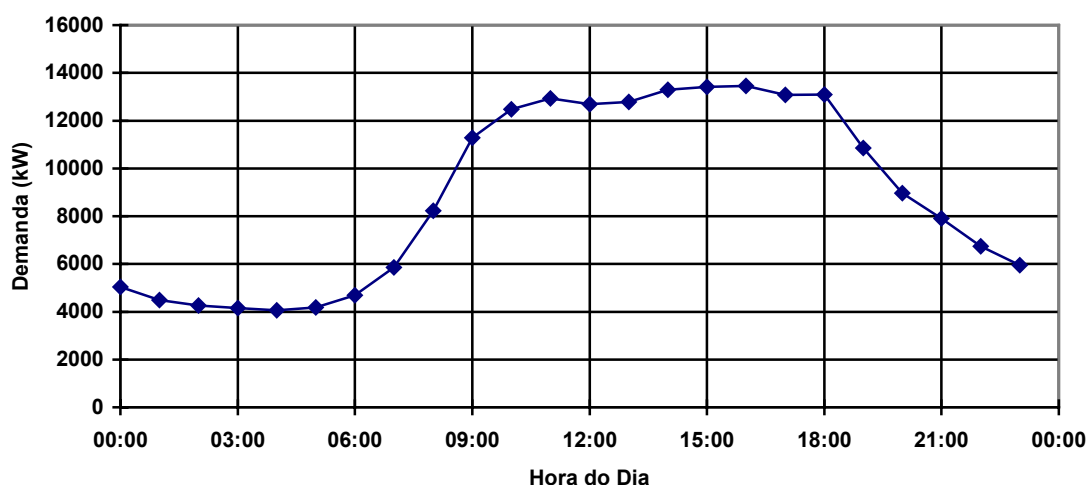


Figura 28: Curva de demanda da região Hiper Centro para dia de maior demanda (dia 01/01/04).

A área Hiper Centro, correspondente à figura 28, apresenta um pico de demanda diurno, permanecendo praticamente constante entre os períodos das 9 horas até às 18 horas.

A área Floresta, correspondente à figura 29, apresenta pico de demanda noturno, que atinge seu máximo valor às 18 horas.

SETOR FLORESTA - DIA DE MÁXIMA DEMANDA (01/01/2004)

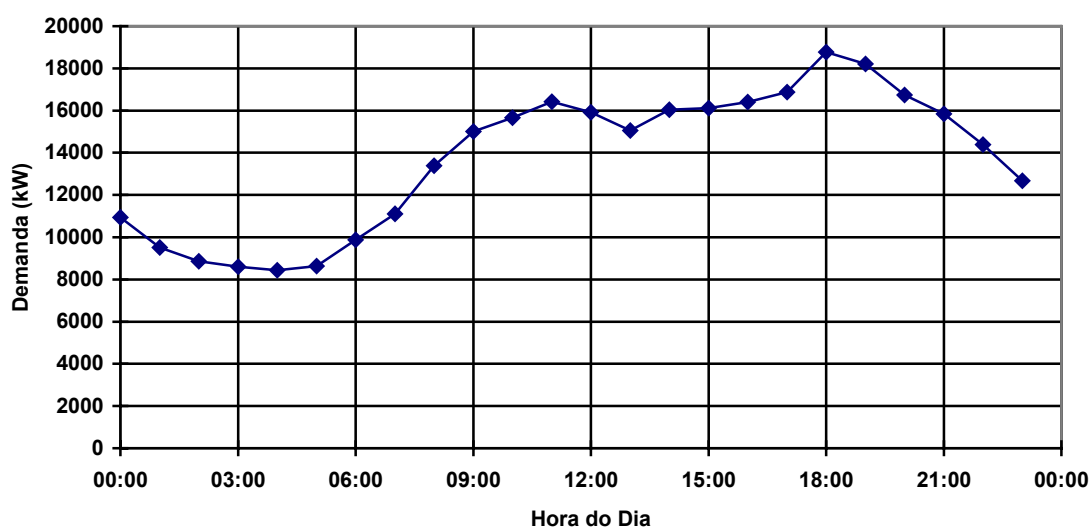


Figura 29: Curva de demanda do setor Floresta da cidade de Belo Horizonte, para dia de maior pico (dia 01/01/04).

O setor Santa Efigênia, correspondente à figura 30, também possui um pico de demanda noturno, que atinge seu valor máximo por volta das 18 horas. Sua curva de carga é bastante semelhante à do setor Floresta.

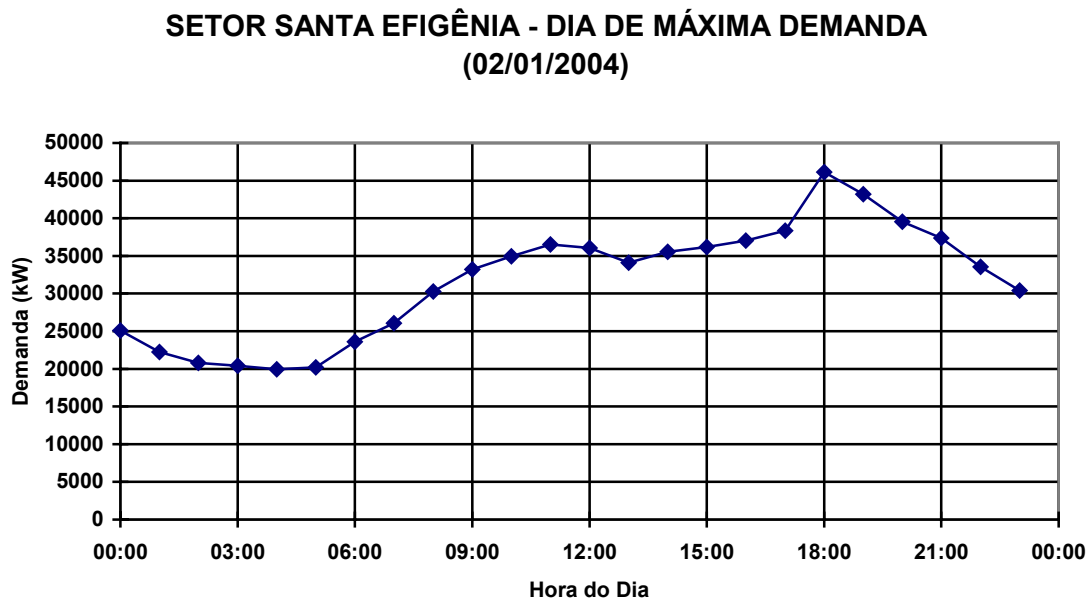


Figura 30: Curva de demanda do setor Santa Efigênia da cidade de Belo Horizonte, para dia de maior pico (dia 02/01/04).

As figuras 31 e 32 são referentes às curvas de geração solar fotovoltaica para dois períodos do ano: mês de janeiro (verão) e mês de julho (inverno), para a cidade de Belo Horizonte. Estes valores foram obtidos através de dados de satélite de radiação solar.

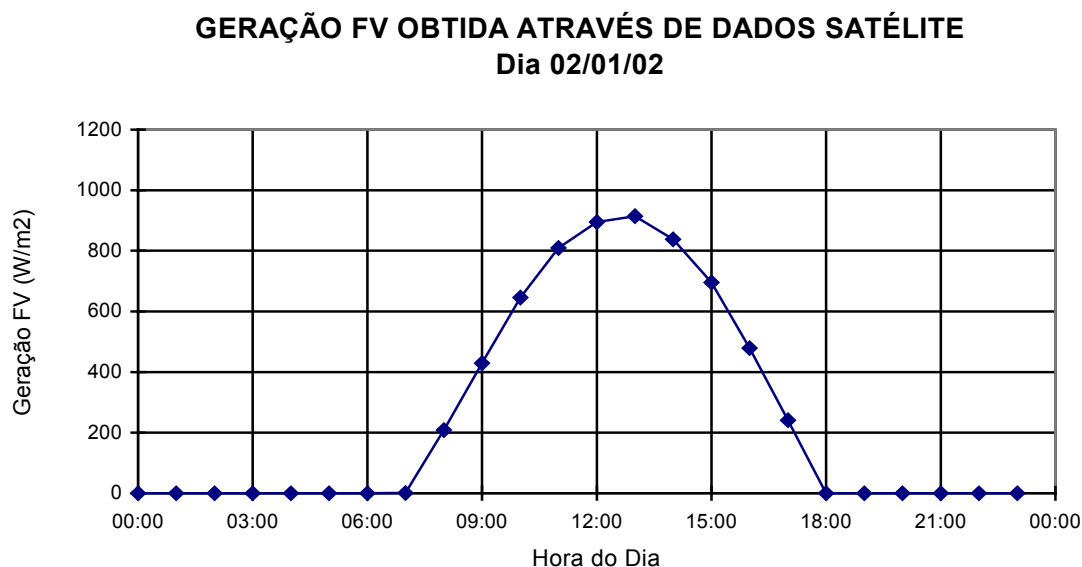


Figura 31: Curva de geração solar para um dia limpo do mês de janeiro, medida através de dados satélites da cidade de Belo Horizonte, considerando as superfícies inclinadas a 20° e voltadas para o norte geográfico.

A geração solar no mês de janeiro ocorre das 6 horas até às 19 horas, atingindo seu valor máximo ao meio dia, horário correspondente a maior incidência solar. Na figura 26, correspondente a geração solar no mês de julho, esta ocorre nos períodos entre as 7:00 e 18 horas, atingindo seu maior valor, também às 13 horas. Portanto, a quantidade de horas de geração FV no mês de julho é significativamente menor em termos de geração de energia.

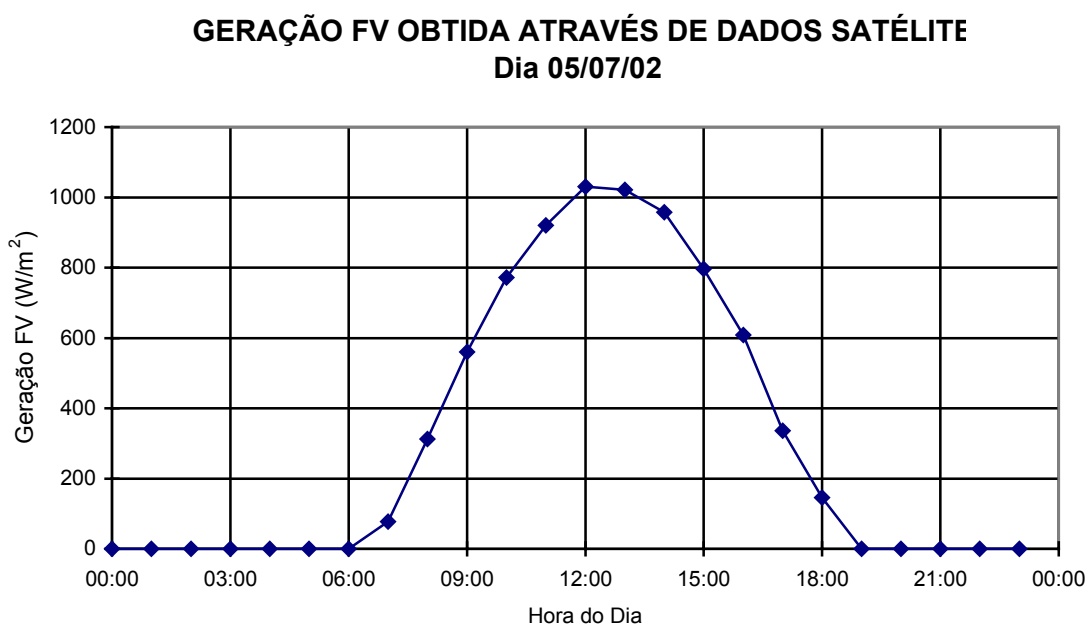


Figura 32: Curva de geração solar para um dia limpo do mês de julho, medida através de dados satélites da cidade de Belo Horizonte, considerando as superfícies inclinadas a 20° e voltadas para o norte geográfico.

4.3.1 CÁLCULO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E ÁREA REQUERIDA

Foram calculados os potenciais da geração fotovoltaica nas coberturas das edificações para os três setores da cidade de Belo Horizonte. Para esta região, assim como para a cidade de Florianópolis, foram considerados três estudos de caso: considerando os painéis na horizontal, considerando os painéis inclinados a 20° (latitude local) e orientados para o norte verdadeiro e por fim, considerando as situações reais das edificações. O terceiro estudo de caso para a cidade de Belo Horizonte, para os três setores analisados, considerou o mesmo percentual de variação na geração de energia entre o caso real das edificações do setor e o segundo estudo de caso (considerado o ideal) do setor Centro da cidade de Florianópolis. Foi adotado o percentual do setor Centro, por ser o maior valor de variação, permitindo, assim, um estudo conservativo. Isto se deve ao fato de que não se dispunha de informações suficientes para a realização do estudo da amostra para a cidade de Belo Horizonte.

Para base de cálculos foram utilizadas as equações descritas no capítulo 3, referente à metodologia.

A quantidade de área de cobertura disponível em cada setor da cidade foi fornecida pela UFMG e pela PRODABEL

Os modelos dos módulos utilizados, foram os mesmos descritos na tabela 3 para a região de Florianópolis.

4.3.1.1 SETOR HIPER CENTRO

Para este setor, basicamente comercial, foram calculados os valores de geração solar fotovoltaica para os três estudos de caso: o primeiro considerando as superfícies dos painéis como horizontais, o segundo considerando-as voltadas para o norte e com inclinação igual a 20° , correspondendo à latitude local de Belo Horizonte e o terceiro considerando o percentual de variação de 65% entre o caso ideal do setor centro da cidade de Florianópolis e o caso real correspondente.

4.3.1.1.1 Primeiro Estudo de Caso – Superfícies Planas e Horizontais

O primeiro estudo de geração solar fotovoltaica, no setor Hiper Centro, foi realizado considerando as coberturas das edificações como planas e horizontais.

A tabela 21 mostra os valores das médias diárias mensais de radiação para os 12 meses do ano, considerando as superfícies dos módulos como planas. Estes valores foram calculados, utilizando o programa *radiasol* para a cidade de Belo Horizonte e esses mesmos valores foram, também, utilizados para o primeiro estudo de caso dos setores Floresta e Santa Efigênia, uma vez que estes não variam de setor para setor. Assim como na cidade de Florianópolis, o que irá influenciar na quantidade de radiação incidente em um plano é a

orientação das placas fotovoltaicas, a inclinação destas e a cidade onde vai ser implementado o sistema.

Tabela 21: Dados de radiação solar para superfícies planas e horizontais da cidade de Belo Horizonte.

Mês	Radiação = i (kWh/m ² /mês)	Mês	Radiação = i (kWh/m ² /mês)
Janeiro	137	Julho	122
Fevereiro	198	Agosto	149
Março	158	Setembro	148
Abril	147	Outubro	215
Maio	131	Novembro	174
Junho	127	Dezembro	158
Média diária mensal (kWh/m²/mês)		155	
G_{POA} (kWh/m²/ano)		1.865	

A figura 33 mostra a curva de incidência de radiação solar para superfícies horizontais para os 12 meses do ano, na cidade de Belo Horizonte.

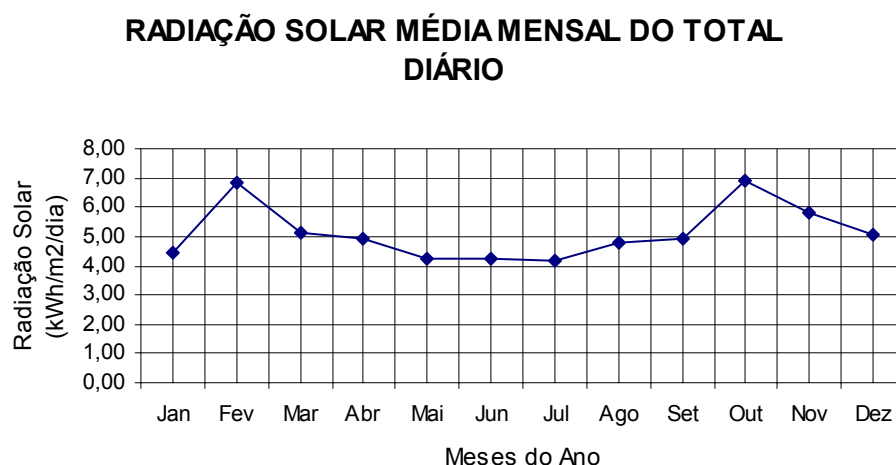


Figura 33: Curva de radiação solar, total diário da média mensal para a cidade de Belo Horizonte, considerando as superfícies como horizontais.

A incidência de radiação solar, no plano horizontal, atinge índices máximos nos meses de outubro e fevereiro e seu menor valor ocorre no mês de julho.

Através dos valores de radiação mensal, foi quantificado o total anual de irradiação no plano do painel.

Para a análise a seguir foram utilizados os dados de consumo de energia, no setor Hiper Centro, obtidos na tabela 20. Esses valores foram os mesmos utilizados para o cálculo de geração fotovoltaica nos dois estudos de caso deste setor.

Através da equação 1, descrita na metodologia, e utilizando os dados de consumo energético e eficiência do sistema inversor, foi obtida a potência instalada necessária para que o sistema seja auto-suficiente, em termos de energia elétrica. Com o valor da potência instalada necessária, foi calculada a área requerida para este sistema, através da equação 2 e utilizando as seis tecnologias disponíveis no mercado. Com base nestas informações foi quantificado o percentual de suprimento do consumo energético, através deste sistema, considerando o primeiro estudo de caso no setor Hiper Centro. Estes valores foram apresentados na tabela 22.

Tabela 22: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Hiper Centro da cidade de Belo Horizonte, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o primeiro estudo de caso (superfícies planas e horizontais).

DADOS DE ENTRADA					VALORES CALCULADOS		
A_{REAL} (m^2)	G_{POA} ($kWh/m^2/ano$)	E (GWh/ano)	N_{EL} (%)	Tecnologias	P_{CC} (kWp)	$A_{REQUERIDA}$ (m^2)	% de Suprimento do Consumo
519.968	1.865	127	90	m-Si	75.783	610.173	85
				a-Si		1.202.913	43
				p-Si		710.249	73
				CdTe		1.144.766	45
				CIS		1.015.865	51
				HIT		468.957	111

Com base nos resultados obtidos, constatou-se que a área disponível no setor Hiper Centro, utilizando o primeiro estudo de caso, não conseguiria suprir todo o consumo do setor. A tecnologia mais eficiente, a HIT, conseguiria gerar 111 % do consumo total do setor. Por outro lado, por se tratar de um setor central, com pico de demanda diurno, qualquer contribuição do sistema FV, seria significativa para a diminuição da sobrecarga da rede e para a redução do pico de demanda dos alimentadores envolvidos.

4.3.1.1.2 Segundo Estudo de Caso – Superfícies Inclinadas a 20 Graus

O segundo estudo de caso, do setor Hiper Centro, considera para cálculo de geração de energia solar fotovoltaica as coberturas inclinadas a 20 graus, equivalente à latitude local da cidade de Belo Horizonte e orientadas para o norte verdadeiro.

A tabela 23 mostra os valores das médias diárias mensais para os 12 meses do ano, considerando as superfícies dos módulos com inclinação igual à latitude local .

Tabela 23: Dados de radiação para superfícies inclinadas a 20 graus e orientadas para o norte geográfico, na cidade de Belo Horizonte.

Mês	Radiação = i (kWh/m ² /mês)	Mês	Radiação = i (kWh/m ² /mês)
Janeiro	135	Julho	143
Fevereiro	195	Agosto	169
Março	163	Setembro	155
Abril	160	Outubro	216
Maio	151	Novembro	169
Junho	155	Dezembro	154
Média diária mensal (kWh/mês)		164	
G_{POA} (kWh/m²/ano)		1.966	

Estes valores de radiação solar, assim como no primeiro estudo de caso, são os mesmos, utilizados para o segundo estudo de caso, dos setores Floresta e Santa Efigênia.

A figura 34 é referente à curva de radiação incidente no plano do painel, inclinado a 20 graus, correspondente à latitude local.

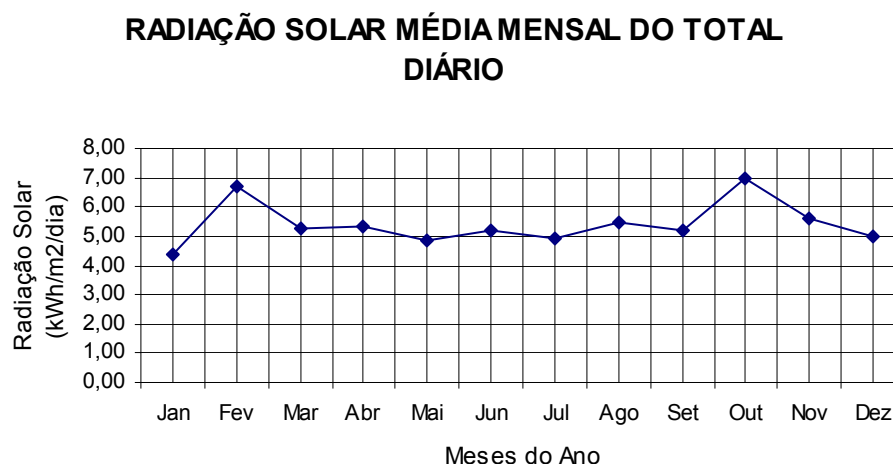


Figura 34: Curva de radiação solar, total diário da média mensal, para a cidade de Belo Horizonte, considerando as superfícies inclinadas a 20 graus.

A curva de radiação solar no plano inclinado do painel, a 20 graus, não difere muito da curva com relação ao plano horizontal. Ambas, atingem seus picos no mês de outubro e seu menor índice de radiação no mês de julho.

Utilizando os valores de radiação da tabela 23, os valores de consumo energético da tabela 20 e os dados de área real do setor e eficiência do sistema inversor, foi calculada a potência de geração fotovoltaica necessária para suprir todo o consumo de energia deste setor, considerando o segundo estudo de caso. Com o valor da potência instalada necessária, foi calculada a área requerida para a implementação deste sistema e verificado o percentual de suprimento do consumo energético do setor, considerando o segundo estudo de caso. Estes valores foram apresentados na tabela 24.

Tabela 24: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Hiper Centro da cidade de Belo Horizonte, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o segundo estudo de caso (superfícies inclinadas a 20 graus e orientadas para o norte verdadeiro).

DADOS DE ENTRADA					VALORES CALCULADOS		
A_{REAL} (m^2)	G_{POA} ($kWh/m^2/ano$)	E (GWh/ano)	N_{EL} (%)	Tecnologias	P_{CC} (kWp)	$A_{REQUERIDA}$ (m^2)	% de Suprimento do Consumo
519.968	1.966	127	90	m-Si	71.874	578.699	90
				a-Si		1.140.866	45
				p-Si		673.613	77
				CdTe		1.085.718	48
				CIS		963.465	54
				HIT		444.768	117

Com base nos resultados obtidos, constatou-se que a área disponível no setor Hiper Centro da cidade de Belo Horizonte, utilizando o segundo estudo de caso, não conseguiria atingir a auto-suficiência com todas as tecnologias estudadas. Com a tecnologia mais eficiente, a HIT, o sistema conseguiria atingir um percentual de 117% do consumo energético do setor, desta forma poderia exportar este excedente de energia para outra área adjacente, já no pior dos casos, com a utilização da tecnologia a-Si, o sistema conseguiria uma produção de energia equivalente a 45% do consumo do setor. Assim como no primeiro estudo de caso, por se tratar de um setor central, com predomínio de pico de demanda diurno, qualquer contribuição do sistema FV, em termos de energia, seria significativa para a concessionária, trazendo grandes benefícios na redução do pico de demanda, por mais que a geração FV não supra todo o respectivo consumo.

O segundo estudo de caso, que considera as superfícies inclinadas de acordo com a latitude local e voltadas para o norte geográfico mostrou apresentar um rendimento 1% maior que o primeiro estudo de caso, que considera as superfícies como horizontais.

4.3.1.1.2 Terceiro Estudo de Caso – Situações Reais das Edificações

Como foi verificado, através do estudo de geração fotovoltaica nos setores da cidade de Florianópolis, o setor que resultou num maior percentual de variação entre o caso ideal (segundo estudo de caso) e o caso real (terceiro estudo de caso), foi o setor centro, com uma relação entre o estudo real e o ideal de 0,34. Desta forma, foi adotado este valor sobre os valores de área estimada e sobre o percentual de suprimento do consumo do caso ideal do setor Hiper Centro. Uma vez que não foi possível a realização do estudo da amostra para a cidade de Belo Horizonte.

A tabela 25 apresenta os dados de entrada para o cálculo da potência instalada pelo sistema (de forma a tornar o setor auto-suficiente) e da área requerida para a instalação desta potência de acordo com as seis tecnologias adotadas para o estudo. Com base nestes valores, foi apresentado o percentual de suprimento do consumo energético do setor, através da utilização da energia FV implementada.

Tabela 25: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Hiper Centro da cidade de Belo Horizonte, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o terceiro estudo de caso (condições reais).

DADOS DE ENTRADA					VALORES CALCULADOS		
A_{REAL} ÚTL (m^2)	G_{POA} ($kWh/m^2/ano$)	E (GWh/ano)	N_{EL} (%)	Tecnologias	P_{CC} (kWp)	$A_{REQUERIDA}$ (m^2)	% de Suprimento do Consumo
178.830	1.966	127	90	m-Si	71.874	578.699	30
				a-Si		1.140.866	15
				p-Si		673.613	26
				CdTe		1.085.718	16
				CIS		963.465	18
				HIT		444.768	40

Conforme os valores percentuais de suprimento do consumo, para cada uma das seis tecnologias adotadas e considerando o terceiro estudo de caso do setor Hiper Centro, o sistema FV, neste caso, não conseguiria gerar energia suficiente para suprir todo o consumo do setor, mas assim como o setor Centro da cidade de Florianópolis, por se tratar de uma área

central, com pico de demanda diurno, coincidente com o da geração FV, qualquer energia injetada neste alimentador estaria contribuindo para reduzir a sobrecarga da rede, pois estaria auxiliando na redução da curva de carga em um horário de pico.

4.3.1.2 SETOR FLORESTA

Para este setor basicamente residencial, também foram calculados os valores de geração solar fotovoltaica para os dois estudos de caso: o primeiro considerando as superfícies dos painéis como horizontais e o segundo considerando-as voltadas para o norte e com inclinação igual a 20° , correspondendo à latitude local de Belo Horizonte.

4.3.1.2.1 Primeiro Estudo de Caso – Superfícies Planas e Horizontais

Para o primeiro estudo de caso do setor Floresta, foram consideradas as coberturas das edificações como planas e horizontais, utilizando os dados radiação solar da tabela 21 e os dados de consumo energético, correspondentes ao setor Floresta, da tabela 20.

Com base nos valores de consumo energético e de radiação solar, obtidos através das tabelas acima mencionadas, e com os valores fornecidos com relação às características do sistema, foi calculada a potência de geração fotovoltaica ideal para a auto-suficiência deste sistema. Desta forma, verificou-se a quantidade de energia solar fotovoltaica que o sistema poderá gerar. Com o valor da potência instalada necessária, foi calculada a área requerida para a implementação deste sistema e, posteriormente, foi verificado o percentual de suprimento do consumo energético do setor, com a utilização desta energia produzida. Estes valores foram apresentados na tabela 26.

Tabela 26: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Floresta da cidade de Belo Horizonte, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o primeiro estudo de caso (superfícies planas e horizontais).

DADOS DE ENTRADA					VALORES CALCULADOS		
A_{REAL} (m^2)	G_{POA} ($kWh/m^2/ano$)	E (GWh/ano)	N_{EL} (%)	Tecnologias	P_{CC} (kWp)	$A_{REQUERIDA}$ (m^2)	% de Suprimento do Consumo
669.099	1.865	41	90	m-Si	24.523	197.446	339
				a-Si		389.250	172
				p-Si		229.829	291
				CdTe		370.434	181
				CIS		328.723	203
				HIT		151.750	441

Com base nos resultados obtidos, constatou-se que a área disponível no setor Floresta, utilizando o primeiro estudo de caso, poderia gerar mais energia do que o consumo do setor, com a utilização de qualquer uma das seis tecnologias disponíveis no mercado. Com a utilização da tecnologia mais eficiente, a HIT, o sistema conseguiria exportar um excedente de energia de 341%. Mesmo com a utilização da tecnologia menos eficiente, a a-Si, o sistema conseguiria ser auto-suficiente e ainda poderia exportar um excedente de energia de 72%, para alguma região adjacente.

4.3.1.2.2 Segundo Estudo de Caso – Superfícies Inclinadas a 20 Graus

O segundo estudo de caso, do setor Floresta, considera para cálculo de geração de energia solar fotovoltaica as coberturas inclinadas a 20 graus, equivalente à latitude local da cidade de Belo Horizonte e orientadas para o norte magnético.

Como se trata de um setor da cidade de Belo Horizonte, utiliza para cálculo dados de radiação da tabela 23, referentes a coberturas inclinadas a 20 graus e dados de consumo correspondentes ao setor Floresta, localizados na tabela 20.

Com base nos valores acima mencionados e com os dados fornecidos, referentes às características do painel, foi calculada a energia gerada pelo sistema.

Através da equação 1, descrita na metodologia, e utilizando os dados acima, foi calculada a potência instalada necessária para que o sistema seja auto-suficiente. Com o valor da potência instalada necessária, foi calculada a área requerida para a este sistema, com a utilização da equação 2, descrita na metodologia. A tabela 27 apresenta estes valores, bem como o percentual de suprimento do consumo energético do setor, para cada tecnologia analisada.

Tabela 27: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Floresta da cidade de Belo Horizonte, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o segundo estudo de caso (superfícies inclinadas a 20 graus e orientadas para o norte verdadeiro).

DADOS DE ENTRADA					VALORES CALCULADOS		
A_{REAL} (m^2)	G_{POA} ($kWh/m^2/ano$)	E (GWh/ano)	N_{EL} (%)	Tecnologias	P_{CC} (kWp)	$A_{REQUERIDA}$ (m^2)	% de Suprimento do Consumo
669.099	19.966	41	90	m-Si	23.258	187.261	357
				a-Si		369.172	181
				p-Si		217.974	307
				CdTe		351.326	190
				CIS		311.767	215
				HIT		143.922	465

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que o setor Floresta, utilizando o segundo estudo de caso, assim como no primeiro estudo de caso, poderia tornar-se auto-suficiente com a utilização de qualquer uma das seis tecnologias FV disponíveis no mercado. Com a tecnologia HIT, a mais eficiente, conseguiria suprir 465% do consumo total do setor. A tecnologia menos eficiente, a a-Si, conseguiria gerar 181% do consumo total do setor Floresta. Portanto, para qualquer uma das tecnologias estudadas, o sistema FV seria capaz de suprir todo o respectivo consumo e ainda poderia exportar o excedente de energia para outra área adjacente, como por exemplo o setor Hiper Centro, que apresenta um menor potencial de auto-suficiência, como demonstrado anteriormente.

O segundo estudo de caso para a cidade de Belo Horizonte, que considera as superfícies com inclinação igual à latitude local e voltadas para o norte geográfico, mostrou ter uma eficiência de 1% maior do que o primeiro estudo de caso, que considera as superfícies na horizontal.

4.3.1.1.3 Terceiro Estudo de Caso – Situações Reais das Edificações

O terceiro estudo de caso do setor Floresta, assim como no setor Hiper Centro, considerou o mesmo valor percentual de variação obtido entre o caso real e o caso ideal do setor Centro da cidade de Florianópolis. Esta relação de 0,34 foi aplicada sobre os valores de área estimada e sobre os valores percentuais de suprimento do consumo do caso ideal (segundo estudo de caso) do setor Floresta.

A tabela 28 apresenta os dados de entrada para o cálculo da potência instalada pelo sistema (de forma a tornar o setor auto-suficiente) e da área requerida para a instalação desta potência de acordo com as seis tecnologias adotadas para o estudo. Com base nestes valores, foi apresentado o percentual de suprimento do consumo energético do setor, através da utilização da energia FV implementada.

Tabela 28: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Floresta da cidade de Belo Horizonte, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o terceiro estudo de caso (condições reais).

DADOS DE ENTRADA					VALORES CALCULADOS		
A_{REAL} ÚTIL (m^2)	G_{POA} ($kWh/m^2/ano$)	E (GWh/ano)	N_{EL} (%)	Tecnologias	P_{CC} (kWp)	$A_{REQUERIDA}$ (m^2)	% de Suprimento do Consumo
227.493	1.966	41	90	m-Si	23.258	187.261	121
				a-Si		369.172	62
				p-Si		217.974	104
				CdTe		351.326	65
				CIS		311.767	73
				HIT		143.922	158

O sistema FV considerando o caso real das edificações do setor Floresta, não conseguiria tornar-se auto-suficiente com a utilização de todas as tecnologias observadas. Isto aconteceria com a utilização das tecnologias mais eficientes, a HIT, a p-Si e a m-Si. Com estas tecnologias o sistema. Além de suprir todo o consumo do setor, poderia exportar a energia excedente para outra área adjacente.

4.3.1.3 SETOR SANTA EFIGÊNIA

Este setor, assim como o Floresta, possui a característica de ser basicamente misto, não havendo um predomínio de horizontalidade ou verticalidade das edificações, nem das suas funções.

Foram calculados os valores de geração solar fotovoltaica para os dois estudos de caso: o primeiro considerando as superfícies dos painéis como horizontais e o segundo considerando-as voltadas para o norte e com inclinação igual a 20° , correspondendo à latitude local de Belo Horizonte.

4.3.1.3.1 Primeiro Estudo de Caso – Superfícies Planas e Horizontais

Para cálculo de geração solar fotovoltaica produzida pelo sistema no setor Santa Efigênia, o primeiro estudo de caso utiliza os dados de consumo energético localizados na tabela 20, referentes ao setor Santa Efigênia e os dados de irradiação solar para coberturas planas horizontais, localizados na tabela 21.

Com base nos valores de consumo energético e de radiação solar, referenciados através das tabelas acima citadas e nos dados fornecidos referentes às características dos módulos FV comercialmente disponíveis, foi quantificada a energia que poderia ser gerada pelo sistema hipotético.

Através da equação 1, descrita na metodologia, e utilizando os dados acima, foi calculada a potência instalada necessária para que o sistema seja auto-suficiente, ou seja, supra todo o consumo do setor. Com o valor da potência instalada necessária, foi calculada a área requerida para este sistema.

Através do cálculo da potência instalada necessária para a auto-suficiência do sistema, dos valores de área requerida para esta potência e considerando as seis tecnologias analisadas, foram obtidos os valores de percentual de suprimento do consumo, considerando o primeiro estudo de caso do setor Santa Efigênia. Estes valores foram apresentados na tabela 29.

Tabela 29: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Santa Efigênia da cidade de Belo Horizonte, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o primeiro estudo de caso (superfícies planas e horizontais).

DADOS DE ENTRADA					VALORES CALCULADOS		
A_{REAL} (m^2)	G_{POA} ($kWh/m^2/ano$)	E (GWh/ano)	N_{EL} (%)	Tecnologias	P_{CC} (kWp)	$A_{REQUERIDA}$ (m^2)	% de Suprimento do Consumo
782.235	1.865	80	90	m-Si	47.901	385.678	203
				a-Si		760.337	103
				p-Si		448.934	174
				CdTe		723.583	108
				CIS		642.107	122
				HIT		296.418	264

Com base nos resultados obtidos, o setor Santa Efigênia, utilizando o primeiro estudo de caso, conseguiria tornar-se auto-suficiente, em termos de energia, com a utilização das seis tecnologias observadas. No pior dos casos, com a utilização da tecnologia a-Si, o sistema conseguiria atingir um excedente de energia de 3% e no melhor dos casos, com a tecnologia HIT, o sistema conseguiria gerar um excedente de 164%. A energia excedente, obtida com a utilização das seis tecnologias, poderia ser exportada para alguma área adjacente.

4.3.1.2.2 Segundo Estudo de Caso – Superfícies Inclinadas a 20 Graus

O segundo estudo de caso, do setor Santa Efigênia, considera as superfícies inclinadas com ângulo igual à latitude local de Belo Horizonte. Para isso utiliza dados de radiação solar da tabela 23. Os dados de consumo energético foram obtidos através da tabela 20, referentes aos valores de consumo energético do setor Santa Efigênia.

Com base nos valores calculados de radiação solar, consumo energético e com os valores fornecidos com relação às características do sistema, foi calculada a energia gerada pelo sistema.

Através da equação 1, descrita na metodologia, e utilizando os dados acima, foi calculada a potência instalada necessária para que o sistema seja auto - suficiente, ou seja, supra todo o consumo do setor. Com o valor da potência instalada necessária, foi calculada a área requerida para este sistema, e verificado o percentual de suprimento do consumo energético do setor, considerando o segundo estudo de caso. Estes valores foram apresentados na tabela 30.

Tabela 30: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Santa Efigênia da cidade de Belo Horizonte, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o segundo estudo de caso (superfícies inclinadas a 20 graus e orientadas para o norte verdadeiro).

DADOS DE ENTRADA					VALORES CALCULADOS		
A_{REAL} (m^2)	G_{POA} ($kWh/m^2/ano$)	E (GWh/ano)	N_{EL} (%)	Tecnologias	P_{CC} (kWp)	$A_{REQUERIDA}$ (m^2)	% de Suprimento do Consumo
782.235	1.966	80	90	m-Si	45.430	365.784	214
				a-Si		721.118	108
				p-Si		425.777	184
				CdTe		686.260	114
				CIS		608.987	128
				HIT		281.129	279

Com base nos resultados obtidos, o setor Santa Efigênia, utilizando o segundo estudo de caso, atingir a auto-suficiência, em termos de energia, com a utilização das seis tecnologias adotadas. Com a utilização da tecnologia mais eficiente, a HIT, conseguiria gerar um excedente de energia de 179% e com a utilização da menos eficiente, a tecnologia a-Si, conseguiria gerar um excedente de energia de 8%. Como observado na tabela, em todos os casos, o sistema além de suprir todo o consumo deste setor, teria um excedente de geração de energia que poderia ser injetado em outro alimentador de alguma área adjacente.

Assim como na cidade de Florianópolis, o segundo estudo de caso, que considera as superfícies com inclinação igual à latitude local e voltadas para o norte geográfico, mostrou possuir uma eficiência de 1% maior do que o primeiro estudo de caso, que considera as superfícies como horizontais.

4.3.1.2.3 Terceiro Estudo de Caso – Situações Reais das Edificações

O terceiro estudo de caso do setor Santa Efigênia, assim como no restante dos setores estudados da cidade de Belo Horizonte, considerou o mesmo valor percentual de variação obtido entre o caso real e o caso ideal do setor Centro da cidade de Florianópolis. Esta relação entre real e ideal foi aplicada sobre os valores de área estimada e sobre os valores percentuais de suprimento do consumo do caso ideal (segundo estudo de caso) do setor Floresta.

Com base nos valores da tabela 30, foram calculados a área útil para a implementação do sistema FV e os percentuais de suprimento do consumo para as seis tecnologias FV adotadas. Estes valores foram apresentados na tabela 31.

O terceiro estudo de caso do setor Floresta, assim como no setor Hiper Centro, considerou o mesmo valor percentual de variação obtido entre o caso real e o caso ideal do setor Centro da cidade de Florianópolis. Esta relação de 0,34 foi aplicada sobre os valores de

área estimada e sobre os valores percentuais de suprimento do consumo do caso ideal (segundo estudo de caso) do setor Floresta.

Tabela 31: Dados de entrada utilizados para o cálculo do potencial FV do setor, valores de área requerida para a instalação da potência (P_{CC}) e valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Santa Efigênia da cidade de Belo Horizonte, utilizando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando o terceiro estudo de caso (condições reais).

DADOS DE ENTRADA					VALORES CALCULADOS		
A_{REAL} ÚTIL (m^2)	G_{POA} ($kWh/m^2/ano$)	E (GWh/ano)	N_{EL} (%)	Tecnologias	P_{CC} (kWp)	$A_{REQUERIDA}$ (m^2)	% de Suprimento do Consumo
265.960	1.966	80	90	m-Si	45.430	365.784	73
				a-Si		721.118	37
				p-Si		425.777	63
				CdTe		686.260	39
				CIS		608.987	44
				HIT		281.129	95

Através desta análise do percentual de suprimento do consumo para o setor Santa Efigênia, considerando o terceiro estudo de caso e as seis tecnologias FV disponíveis no mercado, foi observado que o sistema não conseguiria suprir todo o consumo do setor. No melhor dos casos conseguiria gerar 95% do consumo e no pior dos casos conseguiria atingir uma geração de 37% do consumo total do setor. Por outro lado, por mais que o sistema não tenha conseguido tornar-se auto-suficiente, ele estaria contribuindo para aumentar a capacidade da rede elétrica local.

Este terceiro estudo para o setor Santa Efigênia, assim como o realizado para o setor Floresta pode ser considerado conservativo, uma vez que foi adotado o percentual de variação obtido no setor Centro da cidade de Florianópolis. Partindo do princípio que os setores residenciais, como observado no estudo da amostra do setor Jurerê da cidade de Florianópolis, possuem uma quantidade de área útil maior do que os setores Centrais da cidade.

4.3.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA A CIDADE DE BELO HORIZONTE

Confrontando os valores de consumo energético e geração fotovoltaica nos alimentadores correspondentes a cada setor, pôde-se verificar de que forma o sistema poderá contribuir com a rede elétrica pública daquele centro urbano.

Através da análise das curvas de carga dos setores estudados, observadas anteriormente, pôde-se constatar que somente o setor Hiper Centro possui pico diurno.

A figura 35 corresponde às curvas de geração fotovoltaica, demanda energética e demanda menos geração fotovoltaica no setor Hiper Centro, para o dia de maior pico de demanda. Como este setor possui mais de um alimentador, a curva de demanda desta figura é referente à soma das demandas de todos os alimentadores do setor. A curva superior refere-se à demanda energética no setor, a inferior corresponde à geração fotovoltaica e a intermediária representa a demanda com a geração fotovoltaica, ou seja, a diferença entre elas, para um fator de penetração de geração FV de 20%.

Os dados de geração FV foram calculados a partir de dados de radiação solar obtidos por satélite para um plano inclinado a 20° e orientado para o norte geográfico.

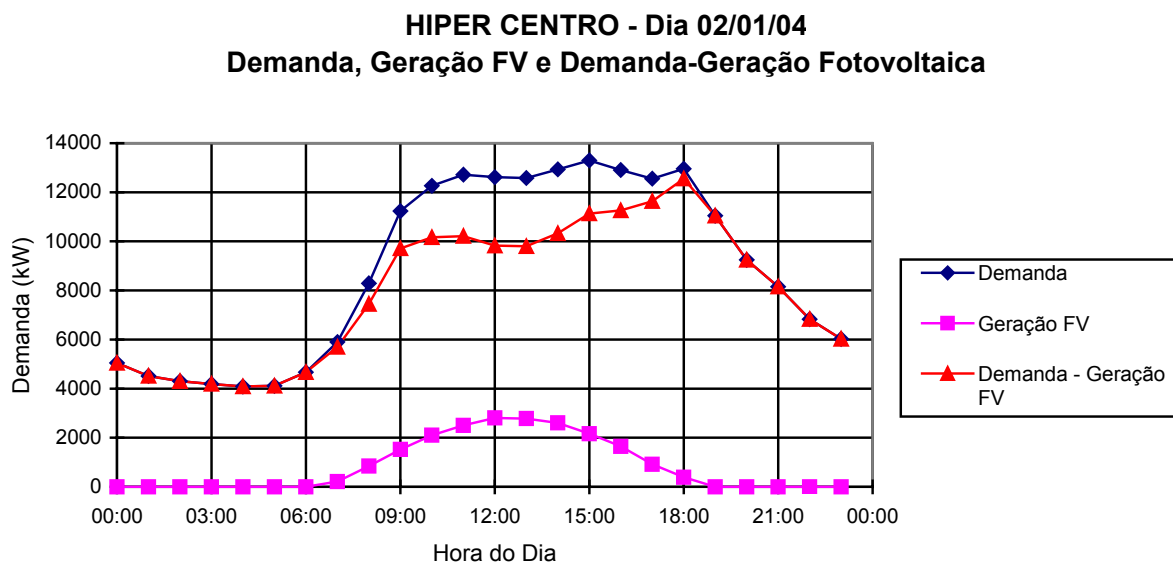


Figura 35: Curvas de demanda, geração solar e demanda menos geração, no setor Hiper Centro da cidade de Belo Horizonte, considerando como potência FV instalada 20% da demanda máxima histórica do setor (dia 02/01/2004).

Observou-se que a energia fotovoltaica gerada pelo sistema iria deslocar o pico de demanda das 15 horas para as 18 horas. Como neste horário a incidência solar é bastante pequena e a demanda ainda é alta, houve uma redução pouco intensa do pico, da ordem de aproximadamente 5%, se comparado com o das 15 horas.

A tabela 32 apresenta os percentuais de suprimento do consumo no Hiper Centro, considerando os três estudos de caso e as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis no mercado.

Tabela 32: Valores percentuais de suprimento do consumo de energia no setor Hiper Centro, da cidade de Belo Horizonte, através da utilização de sistemas FV em toda a área de cobertura das edificações, considerando os três estudos de caso e as seis tecnologias FV disponíveis no mercado.

Estudos de Caso	Percentual de suprimento do consumo no setor Hiper Centro					
	m-Si	a-Si	p-Si	CdTe	CIS	HIT
1 ^o	85	43	73	45	51	111
2 ^o	90	45	77	48	54	117
3 ^o	30	15	26	16	18	40

O sistema FV interligado na rede do setor Hiper Centro em nenhum dos casos e com nenhuma das seis tecnologias FV analisadas conseguiria suprir todo o consumo energético

correspondente, mas por se tratar de uma área com pico diurno, qualquer energia injetada na rede deste setor iria contribuir significativamente com a concessionária para redução do pico de demanda e diminuição da sobrecarga da rede. Com a utilização da tecnologia FV mais eficiente do mercado, utilizando o segundo estudo de caso, o sistema conseguiria suprir 117% do consumo energético do setor.

Conforme observado na figura 35, haveria uma redução de aproximadamente 5% no pico de demanda deste setor, considerando a situação ideal. É importante salientar que, além da energia FV gerada, haveria um benefício ao sistema de transmissão e distribuição. A quantificação destes benefícios deve ser vista com interesse pelas concessionárias no futuro.

A partir da curva de carga de todos os alimentadores do setor Centro, o alimentador BHBP 18 foi identificado como o melhor alimentador a receber um sistema FV, ou seja, aquele que permite uma maior redução da curva de pico.

A curva de demanda deste alimentador foi apresentada na figura 36. Este alimentador possui um pico de demanda diurno, que ocorre por volta das 15 horas.

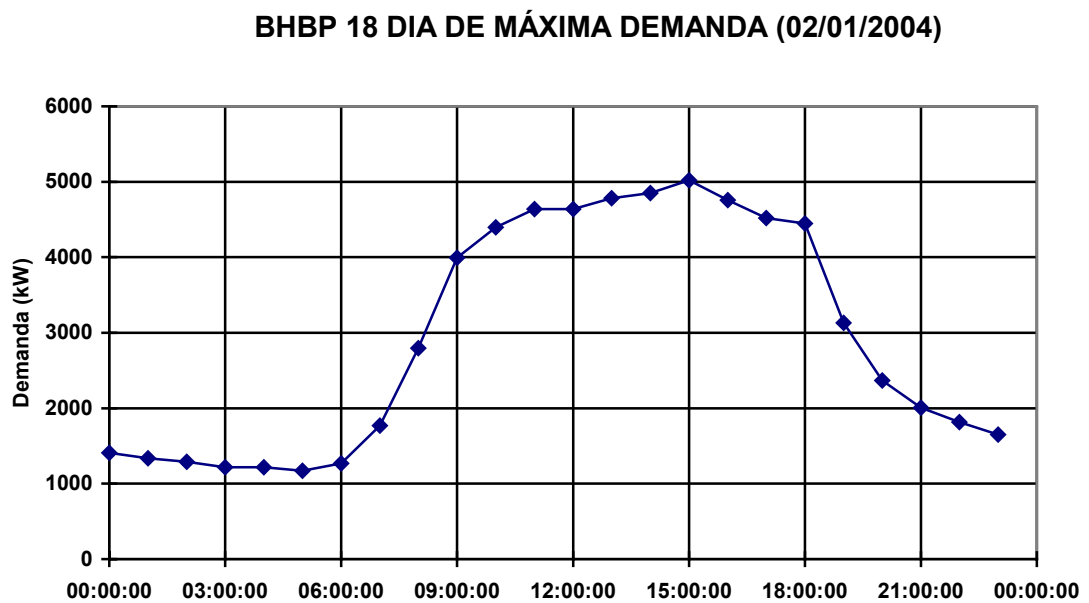


Figura 36: Curva de carga referente ao alimentador BHBP 18 do setor Hiper Centro da cidade de Belo Horizonte, para dia de maior pico, identificado como o melhor alimentador para a implementação do sistema. (dia 02/01/04).

A figura 37 mostra os dados de geração fotovoltaica, demanda energética e demanda menos geração fotovoltaica do alimentador BHBP 18. A curva superior refere-se à demanda energética no setor, a inferior corresponde à geração fotovoltaica, considerando a utilização de toda a área de cobertura do setor para a implementação do sistema FV e a intermediária representa a demanda com a geração fotovoltaica, ou seja, a diferença entre elas.

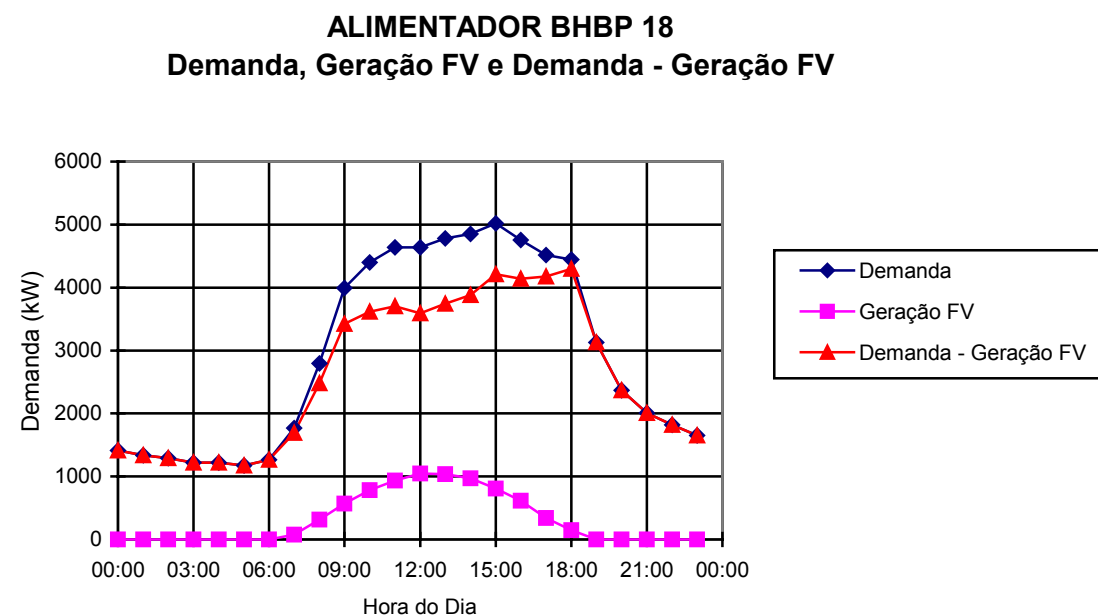


Figura 37: Curvas de demanda, geração solar e demanda menos geração, no alimentador BHBP 18 do setor Hiper Centro da cidade de Belo Horizonte, considerado o melhor alimentador para receber a contribuição da energia fotovoltaica, considerando como potência instalada toda a área de cobertura do setor. (dia 02/01/2004).

Com base nesta figura observa-se que houve uma grande redução no pico de demanda e um deslocamento deste pico das 15 horas para as 18 horas. A redução no pico de demanda foi de aproximadamente 14%, passando de 5.019 kW às 15:00 h para 4.298 kW às 18:00h. Com isso, dos alimentadores analisados, o BHBP 18 mostrou-se o mais beneficiado pela utilização da energia FV. Além da energia gerada, que seria igual para todos os alimentadores, a geração FV seria capaz de reduzir em até 14 % o pico de demanda.

A figura 38 apresenta os valores de demanda, geração FV e demanda menos geração FV para o dia de maior demanda analisado neste estudo do setor Hiper Centro. Os valores de geração FV foram obtidos considerando que toda a área útil real de cobertura do setor seja utilizada para a colocação de módulos fotovoltaicos com a tecnologia baseada em silício amorfo (a-Si).

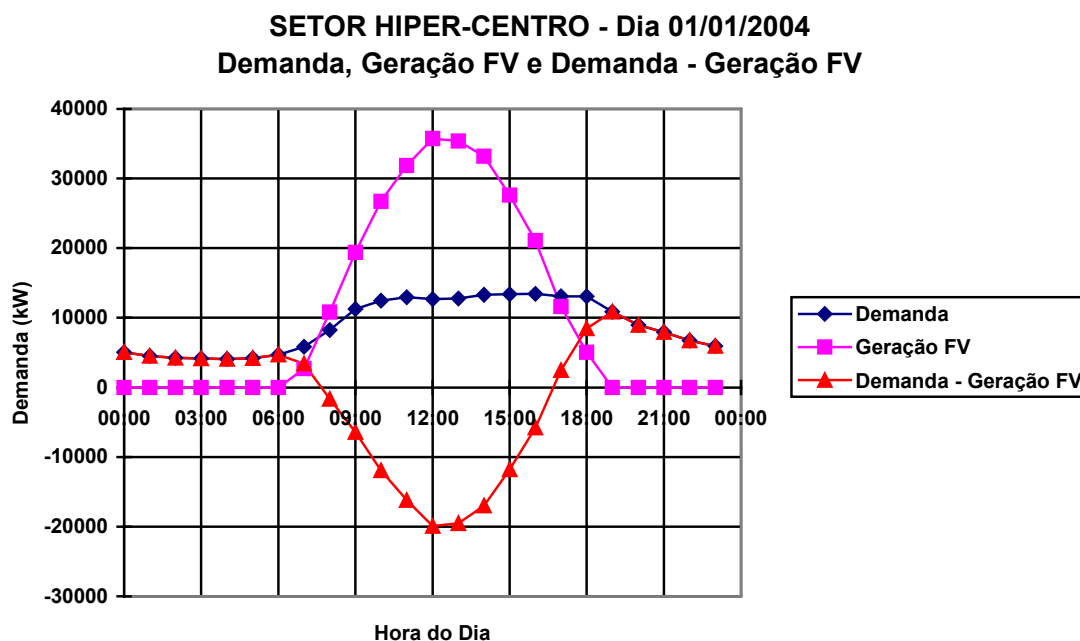


Figura 38: Curvas de demanda, geração solar e demanda menos geração, no setor Hiper Centro da cidade de Belo Horizonte, considerado como potência instalada toda a área de cobertura do setor. (dia 01/01/2004).

Pode-se observar na figura 38 o enorme potencial de geração fotovoltaica existente nas áreas de cobertura das edificações. A instalação de módulos fotovoltaicos que utilizam a tecnologia menos eficiente, a-Si, em toda a área de cobertura das edificações do setor Hiper-Centro, tem um potencial de geração FV nos horários de maior incidência solar (12:00h), que pode atingir valores da ordem de aproximadamente 3 vezes o valor da demanda (Geração FV = 35720 kW, Demanda = 12692 kW). Normalmente, estudos de sistemas fotovoltaicos integrados às edificações e interligados à rede elétrica, consideram um nível de penetração FV da ordem de 10%, ou seja, a potência fotovoltaica instalada corresponde a 10% da demanda (HERIG, C., 2001). Neste caso específico, região Hiper-Centro de Belo Horizonte com painéis de silício amorfo, essa potência instalada de 10% da demanda é atingida com o uso de apenas 3% da área de cobertura estimada das edificações, considerando o caso ideal de disposição dos módulos (segundo estudo de caso) ou aproximadamente 10% da área útil, ou seja, considerando as condições reais das coberturas das edificações (terceiro estudo de caso).

Como somente o setor Hiper Centro possui pico diurno, o estudo de geração solar, demanda energética e demanda menos geração fotovoltaica, considerando toda a área útil de cobertura e a tecnologia FV baseada em a-Si, só foi realizado apenas para este setor, uma vez que nos outros setores a geração FV não iria trazer contribuição significativa para a concessionária, em termos de redução do pico de demanda.

A figura 39 mostra os valores de geração solar FV, demanda energética e demanda menos geração fotovoltaica no setor Floresta, assumindo uma geração FV equivalente a 20% da demanda do setor.

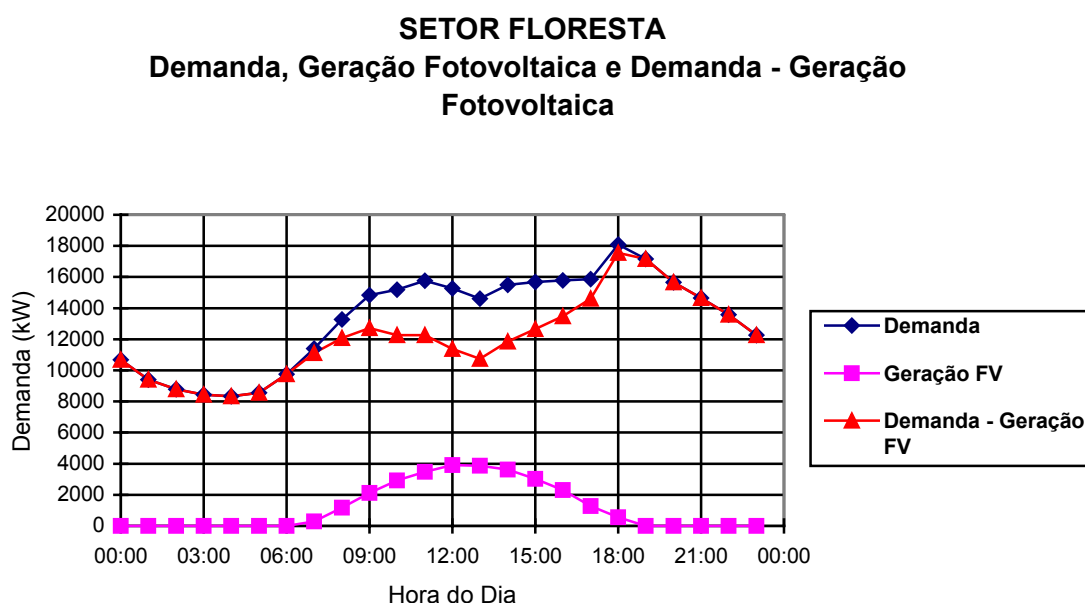


Figura 39: Curvas de demanda, geração solar e demanda menos geração, no setor Floresta da cidade de Belo Horizonte, considerando como potência instalada 20% da demanda máxima histórica do setor (dia 02/01/2004).

Como o setor Floresta não possui pico diurno, a geração fotovoltaica interligada na rede para esta área poderia auxiliar significativamente no suprimento de energia; entretanto, não auxiliaria na redução do pico de demanda dos alimentadores que compõem este setor. Nesses casos a redução da curva de pico seria possível, através de programas de GLD, como

por exemplo, com a utilização de sistemas de aquecimento solar como substituição do chuveiro elétrico. Desta forma, deslocaria o pico para um período diurno e este, então, poderia ser reduzido através da utilização da geração FV.

A tabela 33 corresponde aos percentuais de suprimento do consumo no setor Floresta, considerando os dois estudos de caso e as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis no mercado.

Tabela 33: Valores percentuais de suprimento do consumo de energia no setor Floresta da cidade de Belo Horizonte, através da utilização de sistemas FV em toda a área de cobertura das edificações, considerando os dois estudos de caso e as seis tecnologias FV disponíveis no mercado.

Estudos de Caso	Percentual de suprimento do consumo no setor Floresta					
	m-Si	a-Si	p-Si	CdTe	CIS	HIT
1 ^o	339	172	291	181	203	441
2 ^o	357	181	307	190	215	465
3 ^o	121	60	104	65	73	158

O setor Floresta mostrou possuir uma grande área de cobertura disponível para a implementação de um sistema FV, de forma a suprir as respectivas necessidades energéticas. Como o setor possui um pico de demanda noturno, a geração FV não poderia auxiliar na redução do pico de demanda dos alimentadores que o abastecem, mas por ter a capacidade de gerar grande quantidade de energia FV, poderia evitar que a energia utilizada por este setor percorra grandes distâncias, além de poder também, auxiliar na redução do pico de demanda em outras áreas adjacentes, onde o pico coincida com a geração, como é o caso do setor Hiper Centro, mostrado no exemplo anterior. Em todos os casos estudados, exceto com as tecnologias menos eficientes, a-Si, CdTe e CIS, no terceiro estudo de caso, com a utilização das seis tecnologias analisadas, o sistema conseguiria tornar-se auto-suficiente, em termos de quantidade de energia e ainda poderia exportar o excedente gerado. Desta forma, poderia funcionar como uma mini-usina geradora de energia, que atuaria em paralelo com as centrais convencionais. O terceiro estudo de caso, considerando as condições reais das coberturas,

mostrou ser possível atingir a auto-suficiência na geração de energia com a utilização das três tecnologias FV mais eficientes do mercado. Isso demonstra o grande potencial para a geração FV do setor, mesmo utilizando cálculos bastante conservativos.

A figura 40 mostra os valores de geração solar FV, demanda energética e geração fotovoltaica menos a demanda no setor Santa Efigênia, assumindo uma geração FV equivalente a 20% da demanda do setor.

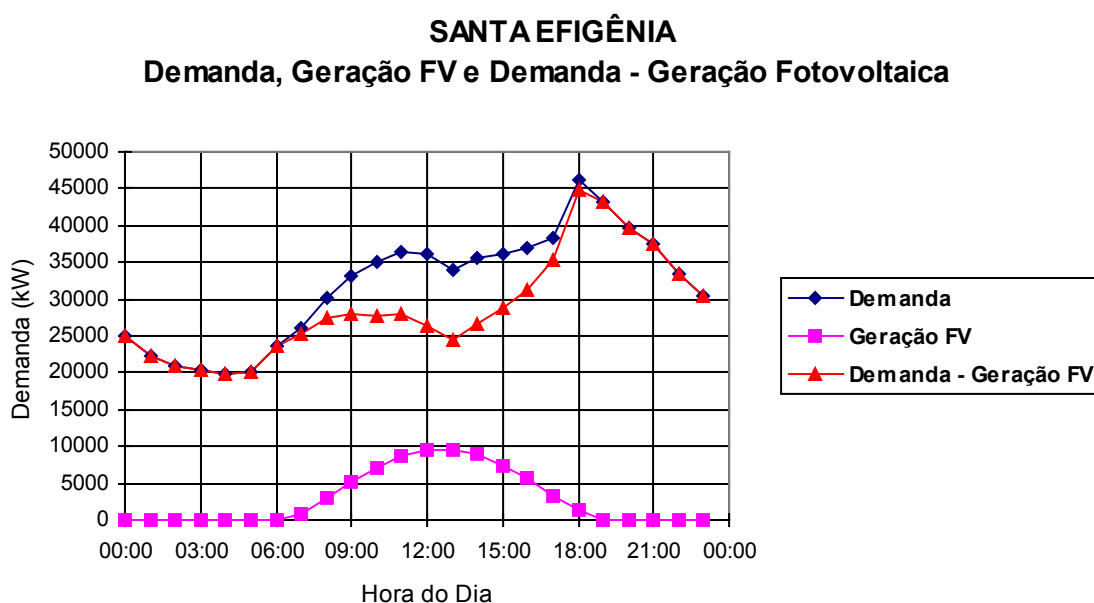


Figura 33: Curvas de demanda, geração solar e demanda menos geração, no setor Santa Efigênia, considerando como potência instalada 20% da demanda máxima histórica do setor (dia 02/01/2004).

Assim como o setor floresta, esta área não possui pico diurno, portanto a geração fotovoltaica interligada na rede para esta área poderia auxiliar significativamente no suprimento de energia; entretanto, não auxiliaria na redução do pico de demanda dos alimentadores que compõem este setor, pois o pico ocorre às 18 horas, período onde já não há mais geração solar. Por outro lado, o sistema poderia funcionar como uma mini usina geradora que levaria a energia gerada para algum alimentador adjacente que possua pico diurno. Outras alternativas seriam os programas de GLD, especialmente com a utilização de

aquecimento solar para o deslocamento do pico de demanda, como já mencionado no setor Floresta.

A tabela 34 corresponde aos percentuais de suprimento do consumo no setor Santa Efigênia, considerando os três estudos de caso e as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis no mercado.

Tabela 34: Valores percentuais de suprimento do consumo de energia no setor Santa Efigênia, através da utilização de sistemas FV em toda a área de cobertura das edificações, considerando os três estudos de caso e as seis tecnologias FV disponíveis no mercado.

Estudos de Caso	Percentual de suprimento do consumo no setor Santa Efigênia					
	m-Si	a-Si	p-Si	CdTe	CIS	HIT
1 ^o	203	103	174	108	122	264
2 ^o	214	108	184	114	128	279
3 ^o	73	37	62	39	44	95

O setor Santa Efigênia possui uma área de cobertura disponível que conseguiria gerar mais energia do que o seu consumo, para os dois estudos de caso, com a utilização das seis quatro tecnologias FV observadas e ainda poderia exportar o excedente de energia gerado. Desta forma, assim como o setor Floresta, o setor Santa Efigênia poderia funcionar como uma mini-usina geradora que levaria a energia excedente para uma área adjacente, podendo auxiliar na redução da curva de demanda do alimentador escolhido, aumentando a capacidade da rede elétrica local. No terceiro estudo de caso nenhuma das alternativas de tecnologia conseguiria atingir a auto-suficiência. Por outro lado, mesmo sem conseguir suprir todo o consumo do setor, este estudo de caso apresentou resultados bastante significativos em termos de geração de energia. A energia gerada não é desprezível, podendo suprir, com a tecnologia menos eficiente, 39% do consumo do setor.

4.4 CONCLUSÕES

A adoção de sistemas FV integrados a edificações e interligados à rede elétrica pode apresentar vários benefícios à concessionária, tanto na região da cidade de Florianópolis, que é uma região menos densa, quanto para a região de Belo Horizonte, que possui um nível de densidade ocupacional do solo bem maior.

Para os três estudos de caso da cidade de Florianópolis e da cidade de Belo Horizonte, o sistema FV hipotético sugerido neste estudo conseguiria gerar energia o bastante para poder ser considerado uma alternativa de geração tecnicamente viável e interessante.

Na cidade de Florianópolis, o primeiro estudo de caso, que considera as superfícies como horizontais e desconsidera as questões reais das edificações, bem como a orientação das coberturas e sombreamento, mostrou uma geração FV de aproximadamente 5% a menos do que comparada com o segundo estudo de caso, que considera as coberturas com inclinação igual à latitude local e voltadas para o norte geográfico (situação ideal) e também desconsidera as questões reais das edificações, bem como a orientação das coberturas e sombreamento. O terceiro estudo de caso, ou seja, o caso real das edificações, que leva em conta as questões de inclinação, orientação e sombreamento das coberturas, mostrou uma geração FV de 66% a menos se comparado com a situação ideal.

Para a cidade de Belo Horizonte, foi observada uma diferença na geração FV entre o primeiro estudo de caso e o segundo estudo de caso de aproximadamente 5%. Este valor difere do percentual obtido para a cidade de Florianópolis uma vez que estas regiões possuem latitudes diferentes. Quanto maior a latitude, maior a variação dos valores de radiação entre o caso que considera os módulos na horizontal e o caso que considera os módulos com inclinação igual à latitude local e orientados para o norte geográfico. O terceiro estudo de caso da cidade de Belo Horizonte considerou a mesma variação na geração de energia FV

entre o caso real e o caso ideal do setor Centro da cidade de Florianópolis, uma vez que não se dispunha de elementos suficientes para a realização do estudo da amostra destes setores. Desta forma, este estudo também apresentou uma geração FV 66% menor do que a comparada com o caso ideal.

Como comprovado através dos três estudos de caso, uma variação de 66% entre a geração considerando a situação ideal e a geração considerando a situação real, torna-se imprescindível o cálculo de geração FV, considerando o caso real das edificações dos setores adotados.

Através dos três estudos de caso, para os setores analisados nas cidades de Florianópolis e Belo Horizonte, pôde-se verificar de que forma o sistema poderia contribuir para a concessionária local. Foi observado que os setores residenciais por terem uma área de cobertura bastante grande se comparada com a dos setores centrais e um consumo energético menor, o sistema FV, tenderia a gerar mais energia do que a consumida pelo setor. Sendo assim, a geração de energia FV excedente poderia ser exportada para outra área adjacente, funcionando assim, como uma mini-usina geradora de energia. Já os setores centrais das cidades, mostraram possuir uma menor relação entre área de cobertura e consumo. Entretanto, a utilização de uma pequena parcela desta área de cobertura, entre 12% e 10%, para a cidade de Florianópolis e para a cidade de Belo Horizonte respectivamente, para a implementação de módulos FV, seria suficiente para atingir os níveis de penetração usualmente assumidos como ideais no gerenciamento da inserção da geração FV em redes de distribuição urbana (HERIG, 2001).

CONCLUSÕES

5.1 Conclusões Finais.....	130
5.2 Limitações do Trabalho.....	133
5.3 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	134

5.1 CONCLUSÕES FINAIS

Com os resultados obtidos na presente pesquisa, pôde-se concluir que a geração solar fotovoltaica integrada à edificação e interligada à rede elétrica pública pode trazer benefícios à concessionária. O fato de o sistema fotovoltaico ser instalado próximo ao ponto de consumo minimiza as perdas por transmissão e distribuição características da geração centralizada convencional, aumentando a eficiência do sistema elétrico. O sistema fotovoltaico apresenta uma excelente capacidade de integração com outras fontes geradoras de energia, podendo aumentar a capacidade da rede elétrica local e auxiliar na redução da curva de carga.

Os estudos realizados em dois setores distintos da cidade de Florianópolis mostram três casos de potencialidades de geração, avaliando as seis tecnologias fotovoltaicas disponíveis no mercado. O setor referente à área residencial mostrou possuir uma grande área de cobertura disponível para a geração fotovoltaica de forma a suprir todo o consumo do setor e ainda poder exportar o excedente de energia. Entretanto, como os picos de consumo energético e geração FV não são coincidentes, a energia fotovoltaica gerada pelo sistema interligada no alimentador correspondente a este setor, não iria trazer benefícios quanto ao alívio da sobrecarga da rede, pois não estaria auxiliando na redução do pico de demanda. Este setor, no entanto, por possuir uma grande área de cobertura disponível para a implementação de um sistema FV, poderia, além de suprir o consumo do setor, servir como uma mini usina geradora de energia, que estaria auxiliando na sobrecarga da rede em outra área adjacente.

O setor Centro da cidade de Florianópolis mostrou que, mesmo caracterizado por edificações verticais, onde o número de pavimentos varia entre 1 e 14, o uso da área útil de cobertura para a implantação de sistemas solares fotovoltaicos pode auxiliar significativamente no suprimento de consumo da região. Considerando apenas a área útil, que

equivale a 34% da área total de cobertura e utilizando a tecnologia menos eficiente, a-Si, é possível gerar 28% do consumo anual do setor. Novas edificações poderiam ser projetadas disponibilizando a área total da cobertura para a implantação de sistemas fotovoltaicos, o que aumentaria ainda mais a capacidade geradora. Além disso, por tratar-se de uma região que possui pico de demanda no período diurno, coincidente com o período de incidência solar, o uso de geração fotovoltaica iria contribuir significativamente para a redução do pico de demanda. Para atingir-se uma potência fotovoltaica instalada equivalente a 10% da demanda máxima, valor esse normalmente utilizado em estudos de sistemas fotovoltaicos integrados às edificações e interligados à rede elétrica (HERIG, 2001), seria necessária a utilização de apenas 4% da área total de cobertura das edificações do setor Centro (FLN), assumindo a situação ideal ou 12% da área útil disponível, no caso real, para a instalação de painéis fotovoltaicos, isso considerando, novamente, a tecnologia menos eficiente (a-Si), ou aproximadamente 4% da área útil real, com a utilização da tecnologia mais eficiente (HIT).

O estudo nos setores da cidade de Belo Horizonte também apresentou bons resultados. O setor Hiper Centro, conseguiria uma geração na ordem de 10% da demanda correspondente, com a utilização de 10% da área de cobertura das edificações do setor, considerando a tecnologia menos eficiente (a-Si), ou 4% com a utilização da tecnologia mais eficiente (HIT), segundo as condições reais destas, assumindo um perfil de área útil semelhante à Florianópolis. O setor Floresta (BH), assim como o setor Jurerê (FLN), nos dois estudos de caso e com a utilização das seis tecnologias disponíveis no mercado, mostrou possuir uma grande área de cobertura para a implementação do sistema solar FV, mas por não apresentar um pico de demanda diurno, a energia gerada não poderia contribuir para a diminuição da sobrecarga da rede nos alimentadores deste setor; por outro lado, este poderia funcionar como

uma mini-usina geradora capaz de auxiliar na redução da curva de carga em alguma área adjacente que possua pico de demanda diurno. O setor Santa Efigênia (BH), assim como o setor Floresta (BH) e o setor Jurerê (FL), mostrou excelente capacidade de funcionamento como uma mini-usina geradora de energia, por possuir grande área de cobertura disponível para a implementação do sistema e por não possuir um pico de demanda diurno.

As duas regiões analisadas mostraram bons resultados em termos de geração fotovoltaica e redução da curva de carga. Foi possível observar que a utilização do sistema em cada setor poderá auxiliar na rede elétrica de diferentes formas: tanto como uma fonte geradora de energia que poderá contribuir com a redução da sobrecarga da rede em alimentadores específicos; quanto como uma pequena usina geradora capaz de diversificar a matriz energética e auxiliar em situações de sobrecarga dos alimentadores de áreas adjacentes. A aplicação deste último caso é importante em regiões que necessitam de energia complementar, mas que não possuem uma área de cobertura disponível para a integração dos painéis solares.

Foi constatada a importância fundamental do estudo detalhado das características construtivas de cada setor a ser analisado, para a verificação do potencial de geração FV correspondente, uma vez que se obteve um grande percentual de variação entre o terceiro estudo de caso (considera as questões reais das edificações dos setores e o sombreamento), o primeiro estudo de caso (que considera as superfícies como planas e horizontais) e o segundo estudo de caso (que considera as superfícies dos módulos com inclinação igual à latitude local e orientadas para o norte geográfico).

O primeiro estudo de caso e o segundo estudo de caso, não podem ser considerados confiáveis em termos de quantificação da energia que cada setor pode produzir. Por outro

lado, puderam dar um panorama geral do potencial de geração FV em cada área e tornar visíveis as variações no rendimento do sistema de acordo com a orientação e inclinação dos módulos FV. Através dos resultados de geração FV, obtidos para cada estudo, foi verificado que os módulos com inclinações iguais à latitude local e orientados para o norte geográfico, geram mais energia do que com qualquer outra disposição. O percentual de variação, no entanto, foi da ordem de aproximadamente 5% para a cidade de Florianópolis e para a cidade de Belo Horizonte, valores baixos o suficiente para que se possa atender bem a requisitos estéticos sem comprometer a performance dos sistemas FV.

No Brasil o uso desta tecnologia de forma integrada a edificações urbanas ainda é bastante reduzido, havendo até o momento somente algumas poucas instalações deste tipo em campi universitários (ZILLES e OLIVEIRA, 2001) (RUTHER, 2004).

5.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

No decorrer da pesquisa, foram encontradas dificuldades, principalmente quanto à aquisição de informações provenientes de órgãos públicos. Como muitas destas informações não foram precisas, houve a necessidade de um estudo quantitativo da margem de erro obtida em determinados estudos de caso.

Para cidade de Florianópolis foram encontradas dificuldades com relação à aquisição de valores precisos de área de cobertura para os setores analisados, havendo assim, a necessidade de um estudo mais elaborado para quantificar a margem de erro entre a área real do setor e a área estimada correspondente. A cidade de Belo Horizonte, ao contrário da cidade de Florianópolis, possui um banco de dados referente à área de cobertura total, correspondente a cada setor da cidade, tornando o estudo mais preciso; por outro lado, os dados de corrente

dos alimentadores individuais apresentam descontinuidades que comprometem a precisão das análises.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo permite que sejam feitas análises do potencial de geração de energia FV para qualquer região do Brasil, bem como para qualquer outro país. Sugere-se que esta metodologia seja aplicada para todas as capitais brasileiras, com o objetivo de verificar o potencial energético das diferentes regiões do país, principalmente na região nordeste, onde há uma maior incidência solar. Para que seja realizado um estudo preciso, é necessário que seja desenvolvida uma metodologia de cálculo para quantificar o total anual de sombreamento de um setor para cada hora do dia, pois a cada instante, a radiação solar varia significativamente.

A metodologia desenvolvida poderia ser aplicada para todas as edificações de caráter público das regiões estudadas, pelo fato de serem ocupadas durante o dia, apresentarem um pico de demanda diurno e serem grandes consumidoras de energia elétrica. Desta forma, seria possível verificar o quanto de energia FV seria necessária para suprir este respectivo consumo e os benefícios adquiridos pela concessionária local, através da utilização da energia complementar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACT ON GRANTING PRIORITY TO RENEWABLE ENERGY SOURCES. **Solar Energy**, n. 70, p. 489-504, 2001.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução 112, de 18 de maio de 1999**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: Abril de 2002.

ALSEMA, E. A. Energy Viability of Photovoltaic Systems. **Energy Policy**, n. 28, p. 999-1010, 2002.

ATHANASIA, A. L. The Economics of Photovoltaic Stand-Alone Residential Households: A Case Study for Various European and Mediterranean Locations. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, n.62, p.411-427, 2000.

BAZILIAN, D. N. et al. Photovoltaic Cogeneration in the Built Environment. **Solar Energy**, n. 71, 2001.

BYRNE, J. et al. Evaluating the Economics of Photovoltaic in a Demand-Side Management Role. **Energy Policy**, n. 24, p. 177-185, 1996.

BORENSTEIN, C. R; CAMARGO, C. de B. **O Setor Elétrico no Brasil: dos desafios do passado às alternativas do futuro**. Porto Alegre, ABDR, 1997.

CARR, A.J. et al. A Comparison of the Performance of Different PV Module Types in Temperature Climates. **Solar Energy**, n.75, p. 285-294, 2004.

EIFFERT, P.; KISS, J. G. **Building-Integrated Photovoltaic Designs for Commercial and Institutional Structures: A sourcebook for Architects**. US Department of Energy's (DOE's). NREL, Fevereiro, 2000.

ELETROBRAS; PROCEL. **Conservação de Energia: Eficiência energética de instalações e equipamentos**. Itajubá, MG, Editora da EFEI, 2001.

ERGE, T. et al. The German Experience with Grid-Connected PV-Systems. **Solar Energy**, n. 70, p. 479-487, 2001.

FEDERAL MINISTRY FOR THE ENVIRONMENT, NATURE CONSERVATION AND NUCLEAR SAFETY. Alexander Platz 6/10178, Berlin, 2000. Disponível em: <<http://www.solarpaces.org/EEG%20English.pdf>> Acesso em: Julho de 2002.

FRANKL, P.; MASINI, A. **Forecasting the Diffusion of Photovoltaic Systems in Southern Europe: A learning curve approach.** In: Technological Forecasting and Social Change n.70, p. 39-65, 2002.

FTHENAKIS, V. M. End-of-life Management and Recycling of PV modules. **Energy Policy**, n. 28, p. 1051-1058, 2000.

GELLER, H. S. **O Uso Eficiente da Eletricidade:** uma estratégia de desenvolvimento para o Brasil. Rio de Janeiro: INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética, 1944.

GREEN M. A. Crystalline and Thin Film Silicon Solar Cells: state of the art and future potential. **Solar Energy**, n.74, p. 181-192, 2003.

GREENPEACE. **Tejados Fotovoltaicos:** una propuesta de gestão ad demanda mediante energia solar fotovoltaica conectada à rede. 1997.

GOETZBERGER, A. et al. Photovoltaic Material, History, Status and Outlook. **Materials Science and Engineering**, n.40, p. 1-46, 2002.

HAMAKAWA, Y. Solar PV Energy Conversion and the 21st Century's Civilization. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, n. 74, p. 13-23, 2002.

HAMMOND, C. R. **The Elements Handbook of Chemistry and Physics.**, ED. D.R. Lide, USA, CRC Press, 1998.

HERIG, C. **Using Photovoltaics to Preserve California's Electricity Capacity Reserves.** National Renewable Energy Laboratory Golden, 2001.

JARDIM, C. et al. **Study of Photovoltaic Potential in Urban Areas With Daytime Load Peaks.** In: Passive and Low Energy Architecture (PLEA), Santiago do Chile, 2003.

- KNIJNIK, R. **Energia e Meio Ambiente em Porto Alegre:** bases para o desenvolvimento. Porto Alegre, CPEA, 1994.
- KUROKAWA, K. PV Systems in Urban Environment. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, n.67, p. 629-637, 2001.
- KURTZ, R. S. et al. Outdoor Rating Conditions for Photovoltaic Modules and Systems. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, n. 62, p. 379-391, 2000.
- LIN, G. Photovoltaic in the Year 2025. **Hydrogen Energy**, n. 25, p. 807-811, 2000.
- MARTIN, E. C. **Edificios Fotovoltaicos Conectados a la Red Eléctrica:** caracterización y análisis. Madrid, 1998.
- MARTINS, A. et al. **Energia e Educação no 3º Grau – Uma Experiência bem Sucedida.** XV SNPTEE, STE, p. 17-22. Foz do Iguaçu, 1999.
- MAYCOCK, P. D. Cost Reduction in PV Manufacturing Impact on Grid-Connected and Building-Integrated Markets. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, n. 47, p. 37-45, 1997.
- MME – MINISTÉRIO DAS MINAS DE ENERGIA. **Balanço Energético Nacional.** Sinopse 2001. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/ben2002/>>. Acesso em: Março de 2002.
- NANN S.; EMERY, K. Spectral Effects on PV- Device Rating. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, n.27, p. 189,216, 1992.
- OLIVEIRA, S. H. F. **Geração Distribuída de Eletricidade:** inserção de edificações fotovoltaicas conectadas à rede no estado de São Paulo. Tese de Doutorado. São Paulo, 2002.
- PARENTE, J. et al. Comments on Experience Curves for PV Modules. **Progress in Photovoltaics: Research and applications**, n. 10, 2002.
- PEARCE, V. M. Photovoltaics - A Path to Sustainable Futures. **Futures**, vol. 34, p. 663-674, 2002.
- POPONI, D. Analysis of Diffusion Paths for Photovoltaic Technology Based on Experience Curves. **Solar Energy**, n. 74, p. 331-340, 2003.

PV NEWS. **Photovoltaic News**. PV energy systems, vol. 16 , n.2, 1997.

PV NEWS. **Photovoltaic News**. PV energy systems, vol. 23, n.4, 2004.

RELATÓRIO DO BRASIL PARA CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **O Desafio do Desenvolvimento Sustentável**. Secretaria de imprensa, Presidência da República. Brasília, 1991.

UFRGS. **Radiasol**. Porto Alegre, 2002. Disponível em: <<http://www.mecanica.ufrgs.br/geste/>>. Acesso em: Junho de 2001.

RODRIGUES, C. **Mecanismos Regulatórios, Tarifários e Econômicos na Geração Distribuída**: o caso dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

RÜTHER, R; G. KLEISS. **Advantages of Thin Film Solar Modules in Façade, Sound Barrier and Roof-Mounted PV Systems**. In: Eurosun 1996. Freiburg, Alemanha, 1996.

RÜTHER, R; DACOREGIO, M. Performance Assessment of a 2kWp Grid-Connected Building Integrated, Amorphous Silicon Photovoltaic Installation in Brazil. **Progress in Photovoltaic: Research and Applications**, n. 18, 2000.

RÜTHER, R; MONTENEGRO, A. **Building-Integrated, Grid-Connected Photovoltaic Installations in Warm Climates**: Choice of Technologies. In: Passive and Low Energy Architecture (PLEA), 18th Conference PL01-183, p.1-6, Florianópolis, 2001.

RÜTHER, R. **Grid Connected PV Systems in Brazil Can Push PV to Mass Production**. In: 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Munich- Germany, 2001.

RÜTHER, R. et al. **High Performance Ratios of a Double-Junction a-Si BIPV Grid-Connected Installation After Five Years of Continuous Operation in Brazil**. In: 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Osaka- Japan, 2003.

RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos: O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligada à Rede Elétrica Pública no Brasil**. Editora UFSC/LABSOLAR Florianópolis, 2004.

RÜTHER, R et al. **Performance Results of the First Grid Connected, Thin Film PV Installation in Brazil** :High Performance Ratios Over Six Years of Continuous Operation. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Paris, França, 2004.

SAGNYO, N. **The Major Japanese Industrial Newspaper**. Disponível em: <<http://www.nrel.gov>>. Acesso em: Janeiro de 2004.

SANYO SOLAR ARK. Disponível em: <<http://www.sanyo.com/industrial/solar/>>. Acesso em: Fevereiro de 2004.

SCHOEN, T. Building-Integrated PV Installations in the Netherlands: Examples and Operational Experiences. **Solar Energy**, n. 70, p. 467-477, 2001.

SICA, E. T. **Externalidades & Bens Públicos: conceitos e factibilidade de correções**. In: Notas de aula fornecidas pela disciplina de Gerenciamento Pelo Lado da Demanda (GLD). Florianópolis, 2002.

SICK, F. et al. **Photovoltaics in Buildings: A Design Handbook for Architects and Engineers**. London, 1996.

US-DOE. **Photovoltaics can Add Capacity to the Utility Grid**, U.S Department of Energy. Disponível em: <<http://www.eren.doe.gov/pv/>>. Acesso em: Outubro de 2003.

ZILLES, R.; OLIVEIRA, F. H. S. **6,3kWp Photovoltaic Building Integration at São Paulo University**. In: 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Munique, Alemanha, 2001.

WOYTE, A. et al. Partial Shadowing of Photovoltaic Arrays with Different System Configurations: literature review and field test results. **Solar Energy**, n.74, p. 217-213, 2003.

TRABALHOS PUBLICADOS

SALAMONI, I.; RUTHER, R. **Sistema Fotovoltaico Integrado à Edificação e Interligado à Rede Elétrica: eficiência energética e sustentabilidade**, In: VII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído (ENCAC). Curitiba, 2003.

SALAMONI, I.; KNOB, P.; RUTHER, R. **Metodologia para Cálculo do Potencial de Geração de Energia Fotovoltaica em Áreas Urbanas**. In: VII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído (ENCAC). Curitiba, 2003.

SALAMONI, I.; KNOB, P.; RUTHER, R. **Methodology to Calculate the Potential of Energy Generation in Urban Areas**. In: Passive and Low Energy Architecture (PLEA). Santiago do Chile, 2003.

SALAMONI, I.; RUTHER, R.; KNOB, P.; ZOMER, C.; DINIZ, C. S. A. **O Potencial dos Sistemas Fotovoltaicos Integrados à Edificação e Interligados à Rede Elétrica: Dois estudos de caso**. In: 10^o Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído (ENTAC). São Paulo, 2004.